

DETERMINACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA EL CÁLCULO DEL IRI

Informe final

Preparado por
Unidad de Investigación (UI)

Ing. Gustavo Badilla Vargas

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2511-4994
E-mail: gbadilla@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Fabián Elizondo Arrieta

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2511-4382
E-mail: felizondo@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Roy Barrantes Jiménez

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2511-4011
E-mail: rbarrantes@lanamme.ucr.ac.cr

San José, Costa Rica

Noviembre 2008

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	4
1.1. Justificación e importancia	4
1.2. Objetivo General	6
1.3. Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL, CONCEPTOS GENERALES	7
2.1. Definición de regularidad superficial	7
2.2. Cálculo de índices de regularidad superficial.....	8
2.3. Consideraciones e implicaciones de la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI)	17
2.4. Equipos existentes para la medición de la regularidad superficial de los pavimentos	18
2.4.1. Nivel y mira topográfica.....	18
2.4.2. Dipstick	19
2.4.3. Perfilógrafos	20
2.4.4. Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)	21
2.4.5. Perfilómetro Inercial.....	23
2.5. Especificaciones de IRI empleadas en otros países, y metodologías empleadas	24
CAPÍTULO 3 CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI EN COSTA RICA.....	26
3.1 Medición del IRI con diferentes equipos de medición en un tramo particular	26
3.2 Variación del IRI según la longitud de evaluación	32
3.3 Efecto de singularidades en la medición y cálculo del IRI	42
CAPÍTULO 4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN COSTA RICA.....	48
4.1 Procedimiento utilizado en Costa Rica para la medición del IRI	48
4.2 Propuesta para la determinación del IRI en Costa Rica	50
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
REFERENCIAS.....	54

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de cuarto de carro	12
Figura 2: Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipo de vías.....	16
Figura 3: Nivel y mira topográfica	19
Figura 4: Equipo Dipstick.....	20
Figura 5: Operación de equipo Dipstick	20
Figura 6: Perfilógrafo California	21
Figura 7: Perfilógrafo Rainhart.....	21
Figura 8: Componentes de equipos tipo respuesta	22
Figura 9: Componentes de equipos con referencia inercial.....	23
Figura 10: Variaciones aparentes de perfiles longitudinales utilizando diferentes equipos	26
Figura 11: Los mismos perfiles de la figura anterior después del filtrado	27
Figura 12: Perfilómetro inercial RSP Mark III. Marca Dynatest.	28
Figura 13: Tramo seleccionado para la medición del IRI.....	29
Figura 14: Perfil longitudinal medido con el Dipstick y con el perfilómetro inercial RSP Mark III.....	29
Figura 15: Perfil longitudinal suavizado del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III.....	30
Figura 16: Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III.....	31
Figura 17: Comparación entre Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III	31
Figura 18: Índice Regularidad Internacional obtenido con el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf.....	33
Figura 19: Comparación de resultados de IRI obtenido entre el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf.....	34
Figura 20: Variación en el valor del IRI según la longitud de evaluación	40
Figura 21: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 20 m.....	41
Figura 22: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 50 m.....	41
Figura 23: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 100 m	41
Figura 24: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 200 m	41
Figura 25: Simulación de una junta de construcción (ejemplo 1).....	44
Figura 26: Simulación de una junta de construcción (ejemplo 2).....	44
Figura 27: Simulación de un bache de 10 m de longitud mal cerrado	45
Figura 28: Simulación de un hueco de 2.5 cm de profundidad y 10 m de longitud	46
Figura 29: Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 1).....	47
Figura 30: Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 2).....	47
Figura 31: Posición de sensores en la barra del perfilómetro láser.....	48

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos.....	24
Tabla 2. Especificaciones internacionales de IRI	25
Tabla 3. Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación.....	35

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e importancia

El desempeño funcional de la infraestructura vial, además de garantizar condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras, repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos.

Diferentes investigaciones realizadas, revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible.

Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Por estas razones, conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente.

Debido a que el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable con el tiempo, se ha convertido en medición atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevos pavimentos; ya que permite evaluar la regularidad superficial de las mismas, y reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantizando de manera indirecta el desempeño estructural del pavimento.

Es posible encontrar investigaciones en las cuales se ha evaluado la influencia de valores iniciales de IRI con el comportamiento del pavimento a largo plazo (Zaghloul, 1996). Estas demuestran que valores iniciales elevados de IRI ocasionan mayores deterioros en el tiempo, mayor costo de mantenimiento, una vida útil de servicio inadecuada y rehabilitaciones o reconstrucciones a temprana edad del pavimento. Aún solucionándose los deterioros iniciales, el pavimento siempre presentará fallas funcionales en el tiempo más graves que aquel pavimento que inició su vida útil con un valor de IRI menor.

En 1988 Michael S. Janoff del JMJ Research, estudió el efecto de la regularidad inicial sobre el rendimiento del pavimento a largo plazo. Los resultados fueron presentados en 1990 en la reunión anual de la NAPA, en la publicación titulada "The Effect of Increased Pavement Smoothness On Long Term Pavement Performance & Annual Pavement Maintenance Cost". Algunos de los resultados obtenidos de este estudio fueron:

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes 10 años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tiene niveles más bajos de agrietamiento para los siguientes 10 años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen costos anuales medios de mantenimiento más bajos para los siguientes 10 años a la construcción.

Debido a estas razones es importante profundizar en el conocimiento de la forma de medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI), así como las especificaciones internacionales que garantizan el desempeño óptimo de las carreteras, de manera tal que se pueda contar con una metodología única que permita evaluar la condición superficial, representada por el IRI, de forma homogénea y objetiva, y posteriormente realizar mediciones en diferentes tramos y compararlos con los valores o especificaciones que habitualmente se usan en el mundo.

Finalmente, en años recientes, Costa Rica ha venido introduciendo la medición del IRI como parámetro de aceptación de diferentes obras viales.

- Ruta 18. Sección Limonal – Tempisque: Reconstrucción y Mejoramiento.
- Ruta 21. Sección Pavones-Intersección Corozal. San Rita-Jicaral-Lepanto-Playa Naranjo II: Mejoramiento.
- Ruta 23. Sección Interamericana-Caldera: Reconstrucción.

Sin embargo el desconocimiento u omisión de algunos detalles propios del método del cálculo de IRI no han permitido una adecuada implementación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), como parámetro de aceptación, control, gestión

La implementación de estas mediciones puede conllevar a la introducción de nuevas tecnologías o técnicas que se emplearan en las obras de pavimentación, que garanticen el

desempeño funcional, lo cual dará repercusiones positivas en la construcción de carreteras en nuestro país.

1.2. Objetivo General

Establecer la metodología de ensayo que se aplicará para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI), como control receptivo en los proyectos de infraestructura vial en Costa Rica, estableciendo el intervalo de longitud para la determinación del IRI.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica para determinar el concepto de Índice de Regularidad Internacional (IRI) y su normativa internacional.
- Determinar los cuidados, detalles y características que deben considerarse para el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).
- Definir el procedimiento y el intervalo de evaluación que debe utilizarse para el cálculo del IRI, tanto para evaluación a nivel de red como control receptivo en los proyectos nuevos.

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN DE LA REGULARIDAD SUPERFICIAL, CONCEPTOS GENERALES

2.1. Definición de regularidad superficial

Las vías terrestres, además de ser medios de comunicación indispensable para los usuarios, deben permitir desplazamientos rápidos, seguros y cómodos. El buen estado de la infraestructura carretera resulta además vital para la operación del transporte, el cual tiene una influencia preponderante en el estado general de la economía de un país. Considerando estos aspectos, la *American Association of State Highway Officials (AASHO)*, en el desarrollo del proyecto AASHO Road Test en 1962, introdujo el concepto de Serviciabilidad, la cual debe ser definida en relación a el propósito de un pavimento construido, esto es, proveer un viaje confortable, seguro y suave a los usuarios. En otras palabras, la serviciabilidad debe estar explícitamente relacionada con los usuarios.

En el ensayo de AASHO, la serviciabilidad se cuantificó inicialmente a través del *Present Serviciability Rating (PSR)*; el cálculo de este índice se realizó por medio de una apreciación subjetiva sobre la calidad de rodado, realizado por un grupo de personas especialmente seleccionadas que formaron parte de un panel evaluador, de modo que representaran a los usuarios. De esta evaluación subjetiva surgió una escala de clasificación que calificó la calidad de ruedo con valores entre 0 (intransitable) y 5 (excelente).

En vista que dicha metodología contenía aspectos subjetivos, dentro del proyecto de AASHO Road Test, se realizaron correlaciones entre el PSR y mediciones objetivas de la condición del pavimento, lo cual contribuyó a determinar el *Present Serviciability Index (PSI)*. De esta forma fue posible estimar el PSI como una función derivada de variables como el "Slope Variance", (SV), la cual corresponde a la varianza de las medidas de desnivel del perfil longitudinal, y considerando el aporte de deterioros como agrietamientos y bacheo.

En la norma de ensayo ASTM E 867-06 *Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*, se define el concepto de *Roughness*, cuya traducción al español es Rugosidad y viene dada por:

"desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal, perfil transversal."

A la luz de esta definición, algunos autores prefieren utilizar el término Regularidad, puesto que este concepto se asocia más fácilmente a la definición de *Roughness*, que el término Rugosidad. De esta manera, puede encontrarse bibliografía que trata indistintamente los conceptos de Regularidad y Rugosidad; sin embargo para efectos del presente documento prefiere utilizarse Regularidad, para referirse a las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad del rodado, seguridad y costos de operación del vehículo.

En la década de los 70's, El Banco Mundial financió diferentes programas de investigación a gran escala, entre los cuales se encontraba un proyecto relacionado con la calidad de las vías y los costos a los usuarios, a través del cual se detectó que los datos de regularidad superficial de diferentes partes del mundo no podían ser comparados. Aún datos de un mismo país no eran confiables, debido a que las mediciones fueron realizadas con equipos y métodos que no eran estables en el tiempo.

2.2. Cálculo de índices de regularidad superficial

El perfil longitudinal de un camino es una representación en dos dimensiones de la superficie del mismo, a lo largo de una línea imaginaria. Por lo tanto, la medición del perfil es una serie de números que representan elevaciones relativas respecto a un nivel de referencia.

De esta manera, se tiene que el índice de un perfil es un valor calculado que resume las variaciones en el perfil de la superficie. Los detalles del cálculo determinan el significado y significancia del índice. El valor del índice puede estar relacionado con un modelo matemático del movimiento de un vehículo o por otros índices comúnmente utilizados.

Se dice que un índice es **portable y reproducible**, cuando este puede ser calculado a partir de un perfil verdadero y por cualquier perfilógrafo válido. Además, se habla que es **estable en el tiempo**, cuando puede ser comparado en el tiempo; puesto que el concepto de perfil verdadero tiene el mismo significado año a año y la subsecuente transformación matemática del perfil verdadero también es estable con el tiempo.

A partir de un simple perfil puede calcularse muchos índices de regularidad. En términos generales, todos los índices de regularidad pueden calcularse empleando transformaciones matemáticas en cuatro pasos básicos. Los detalles en cada uno definirán el índice. A continuación se describen cada uno de estos pasos:

1. *Determinación de la cantidad de perfiles iniciales.* La mayoría de los índices son calculados a partir de un perfil simple, pero algunos índices requieren dos perfiles (generalmente uno sobre cada huella del carril).
2. *Filtrado de longitudes de onda y datos.* Algunos análisis requieren aplicar una secuencia de filtros.
3. *Acumulación y reducción del perfil filtrado.* La secuencia de cantidades filtradas deben ser reducidas a un valor o índice. Comúnmente se realiza una acumulación de los valores absolutos, o una acumulación de los valores elevados al cuadrado, de todos los números. El resultado es un único valor acumulado.
4. *Escalonamiento del índice.* El paso final es convertir el valor acumulado a una escala apropiada. Esto generalmente involucra una división por la cantidad de puntos del perfil o la longitud del perfil para normalizar la regularidad por la longitud cubierta.

Algunos índices de regularidad empleados para cuantificar la regularidad de la carretera son:

- *Mean Panel Rating (MPR):*

El concepto del MPR surge de la evaluación en la pista de ensayo de la AASHTO en 1950. Constituye el valor promedio de la evaluación subjetiva de la calidad de rodado, realizado por un grupo de personas especialmente seleccionadas que formaron parte de un panel evaluador, de modo que representaran a los usuarios. La subjetividad del juicio del MPR dependía fuertemente de las instrucciones dadas a cada uno de los miembros del panel de evaluación, debido a las indicaciones de las propiedades físicas y calidad que debían ser juzgadas.

- Slope Variance (SV):

Es la varianza estadística de la pendiente del perfil de la carretera, muestreado en intervalos de 30.48 cm (1 ft). Este índice es sensible al intervalo de muestreo de los datos del perfil.

- Índice de Perfil (Profile Index, PI):

Es un valor calculado que resume las variaciones en el perfil de la superficie. El valor del índice está relacionado con las masas, resortes de los amortiguadores y suspensión, aplicados a un modelo matemático del movimiento de un cuarto de carro, normalizado a una escala entre 5 (perfectamente irregular) y 0 (máxima regularidad posible).

- Ride Number (RN):

El Ride Number se calcula idealmente a partir de los perfiles obtenidos en las huellas izquierda y derecha de un vehículo. Cada perfil es procesado independientemente y los resultados son combinados en el último paso. Este parámetro puede ser relacionado con el Índice de Perfil (PI) mediante la fórmula: $RN = 5 \cdot e^{160 \times PI}$. La escala de medición está entre 0 y 5, donde 5 representa una rodabilidad perfecta y 0 es impasable.

- Índice de Regularidad Internacional (IRI):

Con el objetivo de unificar los diferentes parámetros que se utilizaban en diferentes países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto *International Road Roughness Experiment (IRRE)*, promovido por el Banco Mundial; en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la regularidad superficial, el cual satisface completamente criterios de ser estable en el tiempo, transferible y relevante, denominado **Índice de Regularidad Internacional (IRI, International Roughness Index)**.

Paterson, en 1986, define el IRI como: "El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS₈₀, Reference Average Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS, Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h".

El cálculo del IRI involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de regularidad asociada al camino; lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático. El primer paso del procedimiento para el cálculo del IRI consiste en medir las cotas o elevaciones de terreno que permiten representar el perfil real de camino, a través de un sistema clasificatorio asociado a la precisión obtenido por parte del instrumento utilizado en la auscultación del camino. Estos datos son sometidos a un **primer filtro**, en el cual se realiza un análisis estadístico (media móvil) y adecuaciones matemáticas para poder generar un nuevo perfil posible de ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que se pudieran observar. Las razones para aplicar este primer filtro se fundamentan en las siguientes razones: a) para simular el comportamiento entre las llantas de los vehículos y la carretera, y b) para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo. Para un perfil que ha sido muestreado a un intervalo Δ , un filtrado de la regularidad por media móvil se define como la sumatoria de:

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=i}^{i+k-1} h_p(j)$$

$$k = \max[1, \text{nint}(L_B / \Delta)]$$

donde:

h_p = elevación del perfil

h_{ps} = elevación del perfil suavizado

max = valor máximo de 2 argumentos,

nint = entero más cercano,

L_B = longitud base de la media móvil, 250 mm

Por ejemplo, si el intervalo de muestreo $\Delta = 150$ mm, la razón (L_B/Δ) es 1.67, la cual es redondeada a 2. El número 2 es mayor que 1, por lo tanto k será 2.

Al nuevo perfil generado se le aplica un **segundo** filtro, el cual se consiste en la aplicación del modelo de cuarto de carro, a través de este se registran las características asociadas al camino basadas en los desplazamientos verticales inducidos a un vehículo estándar. De esta manera, el IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; que modelan simplificadaamente un vehículo como un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera mediante resortes y amortiguadores. El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas que nos lleva a medir los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino. (Ver Figura 1)

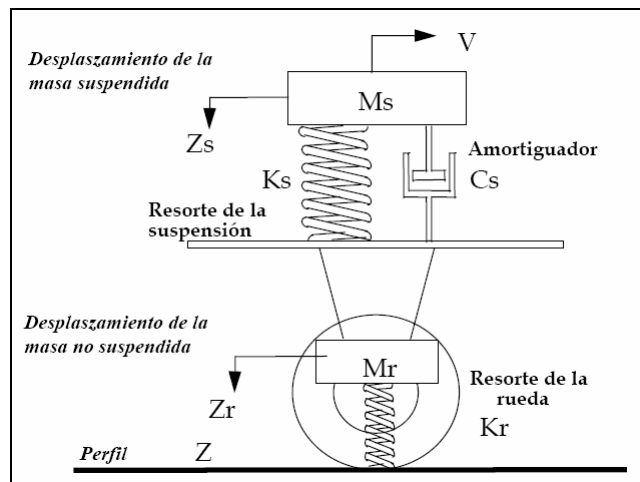


Figura 1: Modelo de cuarto de carro

El modelo de simulación consta de una masa "amortiguada o suspendida" (masa de un cuarto de carro ideal) conectada a una masa "no amortiguada" (eje y neumático), a través de un resorte y un amortiguador lineal (suspensión), y por último el neumático es representado por otro resorte lineal.

El modelo de cuarto de carro emplea los parámetros de lo que se ha denominado como el Carro de Oro, los cuales se muestran a continuación:

$$k_2 = \frac{k_s}{M_s} = 63.3 \quad k_1 = \frac{k_r}{M_s} = 653 \quad c = \frac{c_s}{M_s} = 6 \quad \mu = \frac{M_r}{M_s} = 0.15$$

donde:

k_s : constante del resorte de la suspensión

k_r : constante del resorte de la rueda

M_s : masa suspendida

M_r : masa no suspendida

c_s : amortiguador

Los movimientos sobre el perfil de la carretera están asociados a desplazamientos verticales, velocidad y aceleración de masas, quedando todo el sistema regido por la primera Ley de Newton, $F = m \cdot a$

El modelo del cuarto de carro esta descrito por 4 ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, que pueden ser escrita en forma de matriz cómo siguen:

$$\dot{x} = Ax + Bh_{ps}$$

donde las matrices x , A , y B se definen como siguen:

$$x = [z_s, \dot{z}_s, z_r, \dot{z}_r]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix}$$

$$B = [0, 0, 0, k_1 / \mu]^T$$

donde,

h_{ps} = elevación del perfil suavizado

z_s = elevación (coordenada vertical) de la masa suspendida

z_r = elevación (coordenada vertical) de la masa no suspendida

x = matriz de las variables de estado (variables que en conjunto describen completamente el estado del sistema simulado)

Las derivadas con respecto al tiempo se indican con un punto (por ejemplo, \dot{z}_r). El tiempo está relacionado con la distancia longitudinal a la velocidad simulada del vehículo:

$$t = x/V$$

donde "x" es la distancia longitudinal y "V" es la velocidad, que para el IRI está definida como 80 km/hr. Las unidades de la velocidad deben ser de longitud/segundo, y además las unidades de la longitud deben coincidir con las unidades de "x".

Las ecuaciones dinámicas presentes en el modelo, forman un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil de la carretera (en la parte inferior del "resorte del neumático"). El movimiento vertical del eje respecto a la masa suspendida se calcula y acumula. El valor en m/km (metros acumulados por kilómetro viajado) es la medida final de la regularidad del camino.

El IRI es una acumulación de la simulación del movimiento entre la masa suspendida y la masa no suspendida en el modelo del cuarto de carro, y normalizada a la longitud L, del perfil

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_r| dt$$

Nótese que la ecuación anterior es una ecuación lineal, es decir, si el IRI de una sección de 500 m es 1.0 m/km, y el IRI en la sección siguiente de 500 m es 2.0 m/km el IRI para el kilómetro completo es el promedio aritmético simple: 1.5 m/km.

Una consideración importante de la ecuación diferencial $\dot{x} = Ax + Bh_{ps}$, es que se debe conocer o estimar valores iniciales. De esta manera la respuesta obtenida sobre el perfil incluye una respuesta de transición a partir de los valores iniciales hasta la respuesta inducida por el perfil. Los efectos de esta inicialización disminuyen conforme la simulación del cuarto de coche cubre una mayor distancia del perfil. A una velocidad de simulación del IRI de 80 km/hr, la inicialización influye en el modelo del cuarto de coche en aproximadamente 20 m. Por lo tanto, la manera más precisa de tratar con la inicialización es medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI.

El IRI como indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $IRI = 0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanzar valores de $IRI = 0$ es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito.

Las consideraciones más importantes sobre el IRI son:

- El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil.
- Para el cálculo del IRI es importante considerar la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo utilizado.
- La precisión de los equipos de medida de la irregularidad superficial es uno de los temas más complejos de decidir y valorar.
- El cálculo matemático del IRI relaciona la acumulación de desplazamientos del sistema de suspensión de un vehículo modelo, dividida entre la distancia recorrida por el vehículo a una velocidad de 80 km/hr, y se expresa en mm/m o m/km. Para caminos pavimentados el rango de la escala del IRI es de 0 a 12 m/km, donde 0 representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 20. A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (ver Figura 2).

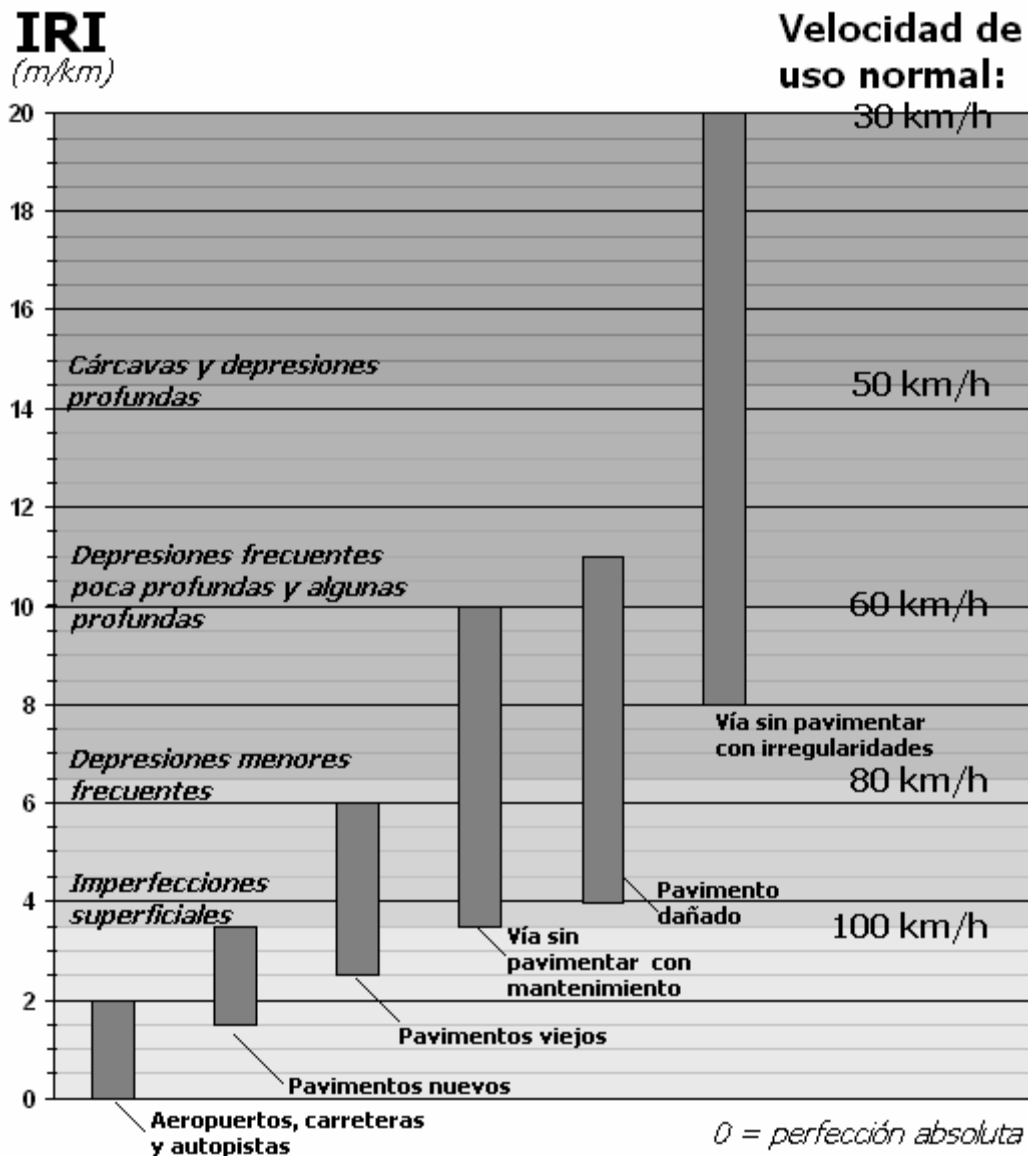


Figura 2: Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías

Fuente: Adaptado de UMTRI Research Review, Vol. 33. Numero 1. Enero-Febrero 2002

- Mean Roughness Index (MRI):

El Mean Roughness Index se calcula como el IRI promedio de las huellas izquierda y derecha de un vehículo. De esta forma que el MRI es expresado generalmente en unidades de mm/m o m/km.

2.3. Consideraciones e implicaciones de la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

En lo que respecta a la medición del IRI se deben considerar los siguientes requisitos:

1. El IRI es calculado a partir de un solo perfil a lo largo de una de la huellas de las llantas de un vehículo. El intervalo de muestreo del perfil debe ser no mayor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de regularidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
2. Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
3. El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos: simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal.
4. El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS, con parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/hr.
5. El movimiento de la suspensión simulada es acumulada y dividida por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado generalmente en unidades de mm/m o m/km.

El IRI está definido como una propiedad de un solo perfil longitudinal, por lo tanto si se desea establecer un valor por pista se debería establecer criterios de cuántos perfiles tomar; generalmente se toman los perfiles en ambas huellas de las llantas de un vehículo para así derivar un valor por carril.

Los sitios de prueba utilizados en el desarrollo del concepto de IRI contaban con una longitud mínima de 320 m. El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de camino; sin embargo, los usuarios deben entender que el cálculo del IRI depende altamente sobre qué longitud es acumulado. Es fundamental entender la relación que existe entre la variación de regularidad a lo largo del camino

y el largo del camino sobre el cual la regularidad es promediada. De esta forma, aunque la bibliografía casi siempre habla solamente del valor del IRI de una carretera, es conocido que para ser precisos se debe añadir cada qué longitud se determina dicho valor, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. Habitualmente el valor unitario más utilizado es cada 0.25 m y el valor global de referencia puede variar dependiendo de cada país o agencia de pavimentos, así por ejemplo, en España, el valor de referencia de cálculo es cada hectómetro.

En vista de la importancia que reviste la longitud para la determinación del IRI, es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

2.4. Equipos existentes para la medición de la regularidad superficial de los pavimentos

Existen diferentes equipos para determinar la regularidad superficial de los pavimentos, los cuales han venido evolucionando en el tiempo, variando unos de otros en la precisión y rapidez para la obtención de los resultados.

2.4.1. Nivel y mira topográfica

Es la manera más conocida para la medición del perfil longitudinal. El equipo consiste en una mira de precisión graduada con unidades convenientes de elevación (típicamente divisiones de cm o ft), y un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal. Debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento, en comparación con otros equipos, es considerado de bajo rendimiento. Tiene una gran precisión y permite obtener una medida exacta del perfil del pavimento, generalmente utilizado cuando se miden pocos perfiles. En los proyectos de gran magnitud, en los cuales es necesario la evaluación de la regularidad superficial, es impráctico y de alto costo (ver Figura 3).



Figura 3: Nivel y mira topográfica

2.4.2. Dipstick

Los equipos Dipstick pueden usarse para obtener una cantidad relativamente pequeña de medidas del perfil longitudinal del pavimento. El Dipstick consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300mm o 250mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 pulgadas), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro. El operador conduce el Dipstick sobre una sección de pavimento premarcada, rotando el instrumento alternadamente sobre cada apoyo (ver Figura 4 y Figura 5). Se registran las lecturas secuencialmente mientras el operador recorre la sección. El dispositivo registra de 10 a 15 lecturas por minuto. El software de análisis es capaz de proporcionar un perfil exacto a ± 0.127 mm (± 0.005 pulg). El Dipstick comúnmente es usado para medir un perfil para la calibración de instrumentos más complejos, tal como los equipos tipo respuesta RTRRMS, así mismo para la verificación de resultados obtenidos por los perfilómetros inerciales.

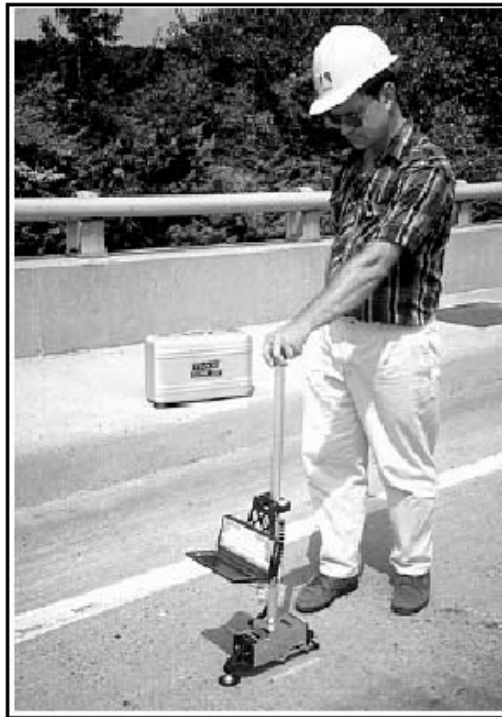


Figura 4: Equipo Dipstick

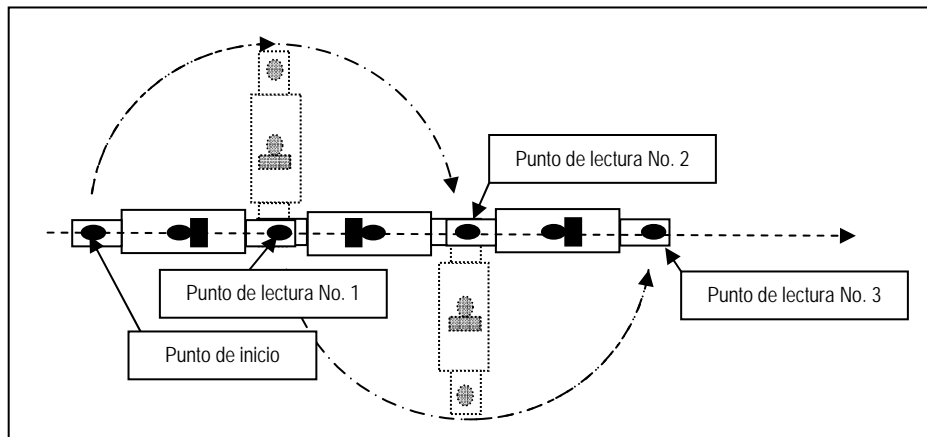


Figura 5: Operación de equipo Dipstick

2.4.3. Perfilógrafos

Los perfilógrafos han estado disponibles durante muchos años y han existido en una variedad de formas, configuraciones y marcas. Dos tipos básicos de perfilógrafos que se han desarrollado, que difieren en la configuración del sistema de ruedas que los soportan, el funcionamiento y procedimientos de medida de los dispositivos, son el perfilógrafo *California* y el *Rainhart* (ver Figura 6 y Figura 7).



Figura 6: Perfilógrafo California

Fuente: Romaro Internacional, S.A de C.V

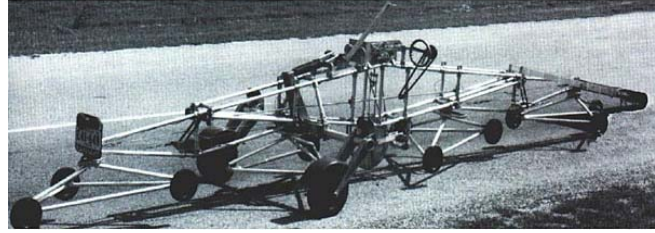


Figura 7: Perfilógrafo Rainhart

Fuente: Rainhart Company

Los perfilógrafos tienen una rueda sensible, montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Los perfilógrafos pueden calcular desviaciones muy ligeras de la superficie y ondulaciones en aproximadamente 6.0 m (20 pies) en longitud.

Los perfilógrafos son aparatos relativamente baratos, simples de manejar y mantener, y proveen un perfil de la superficie analizada que los usuarios fácilmente pueden entender. Ambos son operados manualmente por una sola persona, a la velocidad normal de caminar; por esta razón no se usan para obtener la regularidad de una red de carreteras, labor que requiere de alta velocidad.

Su principal uso ha sido en el control de calidad de construcciones, en los cuales se realizan chequeos de los nuevos tramos de pavimentos con defectos y verificar su corrección. Son también muy apropiados para examinar losas de puentes, así como para aquellos trabajos que requieren sólo una distancia corta de perfil.

2.4.4. Equipos Tipo Respuesta (RTRRMS)

Por largo años, la mayoría de datos de regularidad de los pavimentos de una red fueron obtenidos con vehículos instrumentados con medidores de las irregularidades de las superficies de rodamiento, llamados sistemas de medición de la regularidad de una carretera tipo respuesta (RTRRMS, por sus siglas del inglés "*response-type road roughness measuring system*").

Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera, estos dispositivos están montados en un vehículo liviano, o en un remolque especial. Los equipos RTRRMS

miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto al marco del vehículo. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie (ver Figura 8).

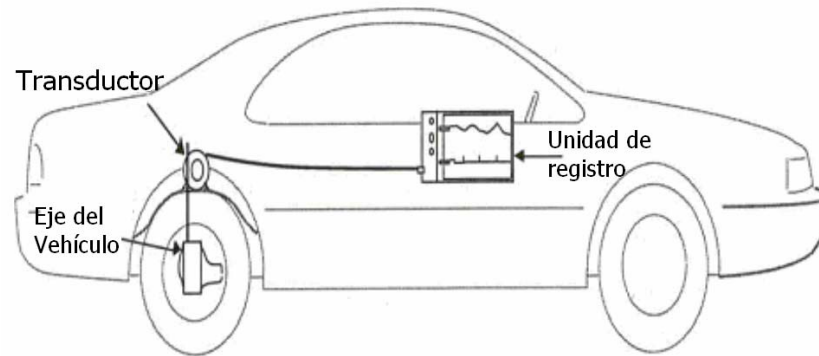


Figura 8: Componentes de equipos tipo respuesta

Fuente: Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness"

Un dispositivo que se ha utilizado comúnmente es el *Mays Ride Meter*, el cual determina la regularidad de la vía midiendo el desplazamiento entre el soporte del eje y la carrocería del vehículo anfitrión. Por consiguiente, el hecho de que el sistema tipo respuesta dependa de la dinámica del vehículo anfitrión tiene varios efectos no deseados:

- Las medidas de regularidad no son estables en el tiempo, es decir, las medidas realizadas recientemente con un RTRRMS, no pueden ser comparadas con aquellas mediciones realizadas en años anteriores.
- Las medidas de regularidad no son transportables. Las mediciones realizadas por un RTRRMS que utiliza un determinado sistema son raramente reproducibles por otro.

A pesar de estos y otros problemas asociados con medidores tipo respuesta, han estado funcionando durante los últimos 50 años y aún con el advenimiento de otros perfilógrafos, gran cantidad de agencias de carreteras los siguen usando.

2.4.5. Perfilómetro Inercial

El perfilómetro inercial es un equipo de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino; concebidos especialmente para el análisis de la regularidad superficial de la carretera, tanto longitudinal como transversal, superando la calidad y precisión a cualquier equipo tradicional.

Estos equipos producen medidas continuas del perfil longitudinal a altas velocidades a través de la creación de una referencia inercial, integrado por acelerómetros colocados en el vehículo los cuales permiten obtener el movimiento vertical del mismo y sensores de "no contacto" (por ejemplo, dispositivos láser infrarrojos) utilizados para medir el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento (ver Figura 9).

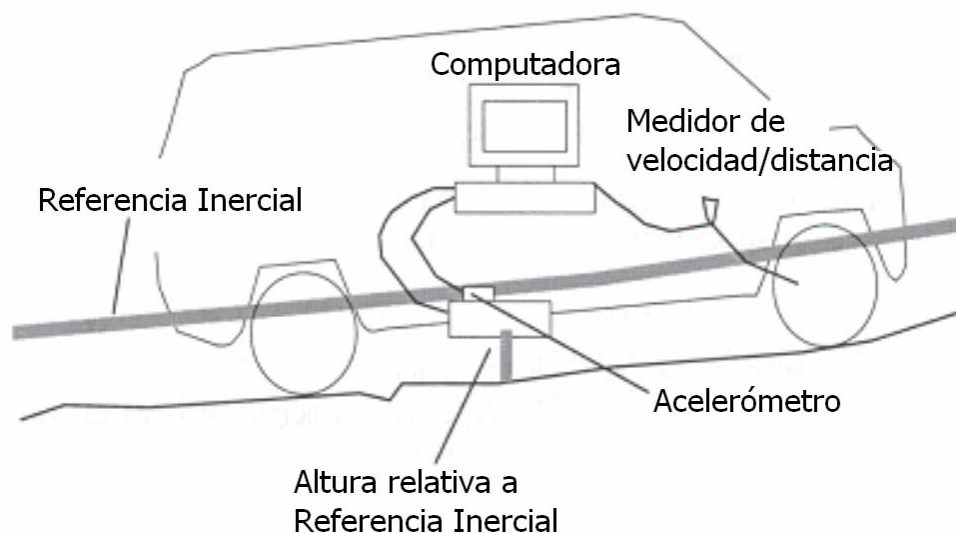


Figura 9: Componentes de equipos con referencia inercial

Fuente: Adaptado de "A synopsis on the current equipment used for measuring pavement smoothness"

Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento. Generan el perfil longitudinal del camino en tiempo real y sobre todo tienen la ventaja de realizar las mediciones a altas velocidades, facilitando la obtención de datos en una determinada vía.

A continuación se resumen las principales características de los equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial (ver Tabla 1).

Tabla 1. Equipos utilizados para la medición de la regularidad superficial de pavimentos

Equipo	Grado de precisión	Implementación	Complejidad del equipo	Observaciones
Nivel y mira topográfica	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Simple	Poco práctico y costos muy elevados para proyectos largos
Dipstick	Muy alto	Mediciones de perfil y calibración de equipos más complejos	Muy Simple	Poco práctico y costos elevados para proyectos largos
Perfilógrafos	Medio	Control de calidad y recepción de obras	Simple	No son prácticos para evaluar la condición a nivel de red
Equipos tipo respuesta (RTRRMS)	Medio	Monitoreo de carreteras a nivel de red	Compleja	Los resultados no son transportables ni estables en el tiempo, pues dependen de la dinámica particular del movimiento del vehículo
Perfilómetro inercial	Muy alto	Monitoreo de carreteras a nivel de red y recepción de proyectos viales	Muy Compleja	Equipo de alta precisión, cuyos resultados son transportables y estables en el tiempo. Su principal uso es la evaluación de red viales grandes

Fuente: Adaptado de Ventura, J. Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI)

2.5. Especificaciones de IRI empleadas en otros países, y metodologías empleadas

Actualmente en otros países se están llevando a cabo proyectos para afinar más aún el valor del IRI inicial en la construcción de pavimentos. Las investigaciones tienen como objetivo proponer nuevos valores iniciales de IRI para la recepción de pavimentos, proponer acciones de mantenimiento efectivas y recomendar especificaciones para controlar el IRI durante el proceso constructivo. En Estados Unidos cada estado posee sus propios umbrales de recepción de pavimentos, así como su metodología de evaluación continua de la red vial. En el estado de Georgia, el cual posee las vías con mejor capacidad funcional del país, el 97% de su red vial posee un valor de IRI menor de 1.2 m/km. A continuación se presentan algunas de las especificaciones de IRI empleadas en otros países, así como el intervalo de medición empleado en cada uno (ver Tabla 2)

Tabla 2. Especificaciones internacionales de IRI

Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie		
		Asfalto	Hidráulico	Tratamiento superficial
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 2.0 m/km Promedio Individual ≤ 2.8 m/km		Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 3.0 m/km Promedio Individual ≤ 4.0 m/km
	Recepción de Obra Nueva			
	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 1.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.3 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.8 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.4 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 3.4 m/km, en el 99% de los datos
CR-2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 2.0 m/km Promedio Individual ≤ 3.0 m/km		---
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos con un intervalo de medición de 100 m	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.0 m/km, en el 80% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.5 m/km, en el 100% de los tramos del proyecto		
WisDOT, Wisconsin Estados Unidos	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	IRI m/km	Tiempo	---
		< 1.1	Pav. Nuevo	
		< 1.17	1 Año	
		< 1.29	2 Años	
		< 1.33	3 Años	
< 1.37	4 Años			
< 1.45	5 Años			
Suecia	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 200 m	IRI ≤ 1.4 m/km IRI ≤ 2.4 m/km		---
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	Caminos Rurales			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 3.0 m/km	---	---
	Vías Interurbana			
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 2.0 m/km	IRI ≤ 2.5 m/km	---
Quebec, Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 1.2 m/km, en el 70% de los datos IRI ≤ 1.4 m/km, en el 100% de los datos	---	---
Eslovenia	Carreteras de alto tránsito			
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	2.0 \leq IRI \leq 2.6 m/km 1.2 \leq IRI \leq 1.8 m/km	---	---
	Carreteras de bajo tránsito			
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	4.0 \leq IRI \leq 4.6 m/km 3.0 \leq IRI \leq 3.8 m/km	---	---
Portugal	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 80% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 90% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 75% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 100% de los datos	---

CAPÍTULO 3 CONSIDERACIONES PARA ESTABLECER LA METODOLOGÍA DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DEL IRI EN COSTA RICA

3.1 Medición del IRI con diferentes equipos de medición en un tramo particular

La investigación llevada a cabo permitió conocer la forma de obtención del Índice de Regularidad Internacional (IRI), el cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático, en el cual se involucran aspectos de análisis estadístico del perfil y una posterior modelación para medir la rugosidad asociada al perfil del camino.

Como se mencionó anteriormente el IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal, obtenidas por cualquier técnica o equipo de medida de perfil longitudinal. Sin embargo, es importante destacar que, graficar las elevaciones versus la distancia longitudinal para un mismo tramo de carretera empleando diferentes equipos no necesariamente implica que los perfiles longitudinales medidos coincidan entre sí. Por ejemplo, la Figura 10 muestra los perfiles longitudinales obtenidos a partir del Dipstick y otros dos perfilómetros inerciales (ICC Laser y K.J. Law), los cuales evidentemente son muy diferentes entre sí. Estas diferencias se deben principalmente a la conjugación entre la parte del perfil del camino que contribuye a la regularidad y la pendiente total del tramo seleccionado. En otras palabras, dependiendo del equipo se establecen niveles de referencia diferentes para la determinación del perfil; es decir, en el caso del Dipstick se registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro, mientras que en el caso de los perfilómetros inerciales, las elevaciones se registran respecto a un eje de referencia inercial, lo cual genera las diferencias mostradas en la Figura 10.

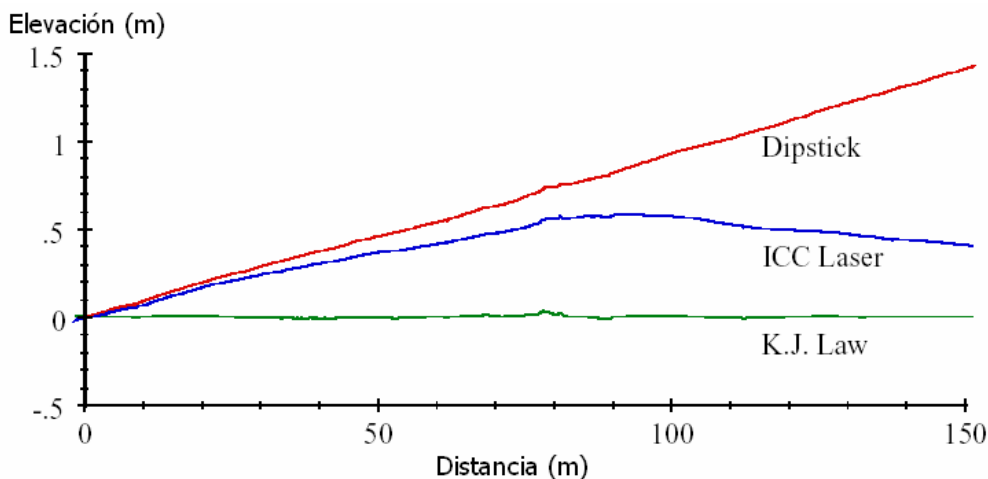


Figura 10: Variaciones aparentes de perfiles longitudinales

utilizando diferentes equipos

Una vez que se cuenta con el perfil longitudinal, este es sometido al primer filtro, que consiste en una serie de adecuaciones matemáticas y análisis estadístico (media móvil), para generar un nuevo perfil suavizado de las irregularidades. Tal y como se muestra en la Figura 11 los perfiles anteriores después de la aplicación del primer filtro muestran básicamente el mismo patrón.

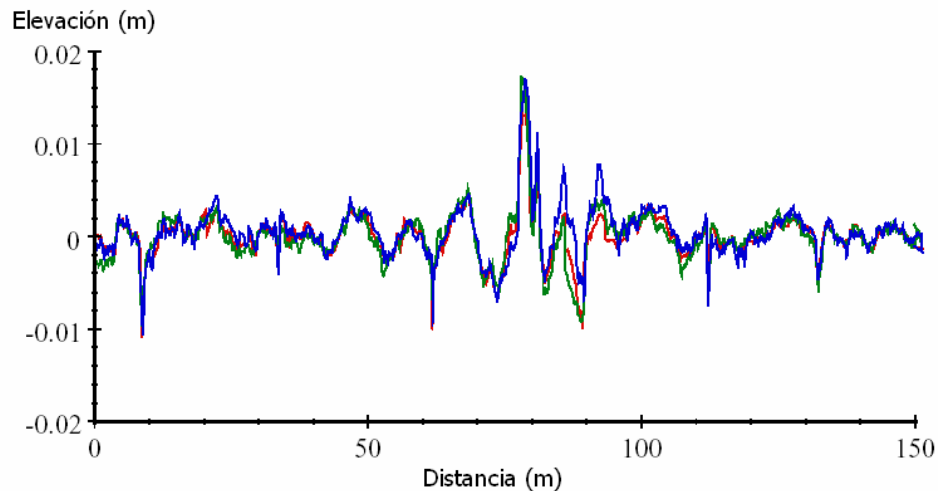


Figura 11: Los mismos perfiles de la figura anterior después del filtrado

Finalmente a este perfil suavizado se le aplica el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro, RQCS, a una velocidad de 80 km/hr y se le determina finalmente el IRI. Este segundo filtro mide los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino.

Teniendo en consideración estos principios teóricos básicos se procedió a la selección de un tramo de carretera en el cual se pudiera corroborar lo mencionado anteriormente. Se seleccionó un tramo de 230 metros de longitud, ubicado dentro de las Instalaciones Deportivas de la Universidad de Costa Rica, específicamente en el boulevard de la entrada principal (ver Figura 13). En este tramo se realizó la medición del perfil longitudinal utilizando el Dipstick, y la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI) con un perfilómetro inercial RSP Mark III de la marca Dynatest (ver Figura 12)



Figura 12: Perfilómetro inercial RSP Mark III. Marca Dynatest.

Propiedad del Laboratorio Nacional de Materiales y
Modelos Estructurales (LanammeUCR)

Nuevamente, como se puede observar en la Figura 14, los perfiles longitudinales obtenidos utilizando el perfilómetro inercial RSP y el Dipstick muestran dos comportamientos muy diferentes. Sin embargo, después de la aplicación del primer filtro, se puede notar en la Figura 15 que los perfiles filtrados prácticamente son iguales.



Figura 13: Tramo seleccionado para la medición del IRI

Fuente: Imagen tomada y adaptada de Google Earth 2008

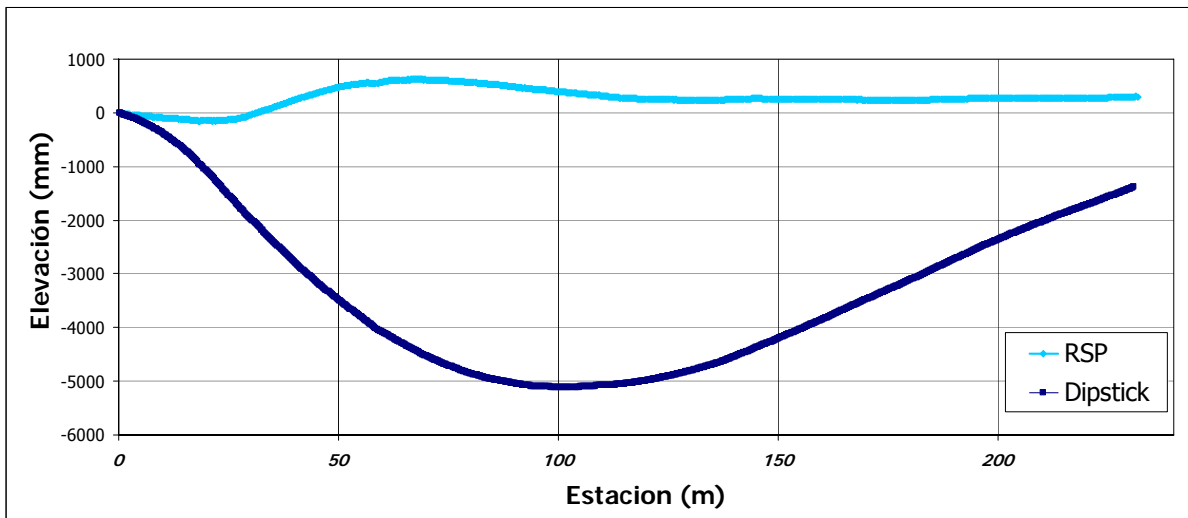


Figura 14: Perfil longitudinal medido con el Dipstick y con el perfilómetro inercial RSP Mark III

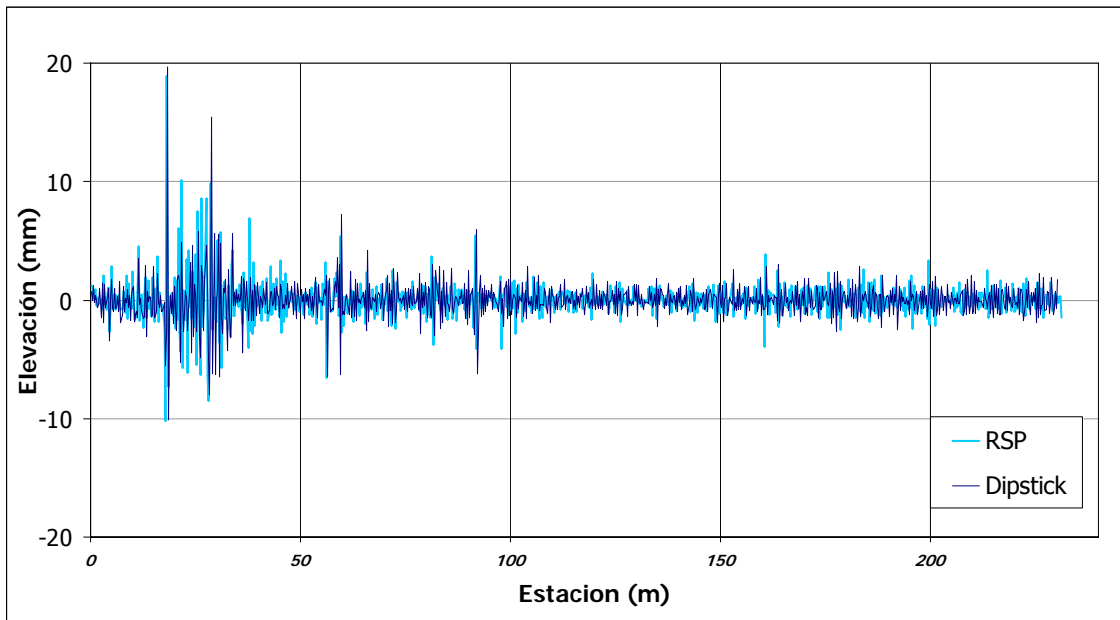


Figura 15: Perfil longitudinal suavizado del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III

Finalmente a estos perfiles suavizados se les aplicó el segundo filtro de la simulación del cuarto de carro. Los movimientos verticales del eje respecto a la masa suspendida se calcula y se acumula. El valor en m/km (metros acumulados por la suspensión por kilómetros viajados) es la medida final de la regularidad del camino. De esta manera la Figura 16 y Figura 17, muestran la comparaciones que se hacen entre el IRI obtenido directamente el perfilómetro inercial y el obtenido con el Dipstick. Nótese, que en los primeros 20 m, se observan grandes diferencias entre el IRI obtenido con el perfilómetro inercial y el Dipstick, lo cual puede ser justificado por lo expuesto anteriormente, de que el modelo del cuarto de coche requiere de aproximadamente 20 m para inicializar sus variables, lo cual constituye una consideración importante y confirma la necesidad de medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI, particularmente cuando se hacen mediciones con equipos estáticos o perfilógrafos, puesto que en general los perfilómetros inerciales requieren de al menos 150 metros para alcanzar la velocidad de medición lo que permite a su vez inicializar las variables del modelo antes del punto de inicio.

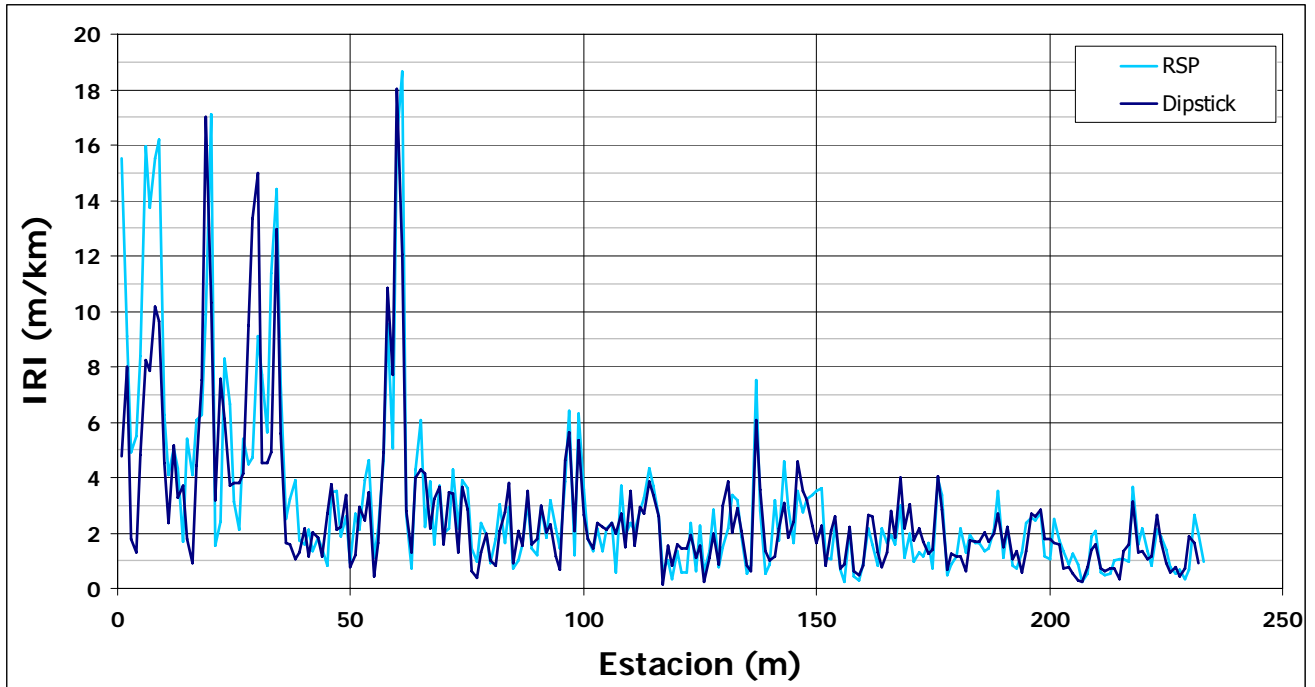


Figura 16: Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III

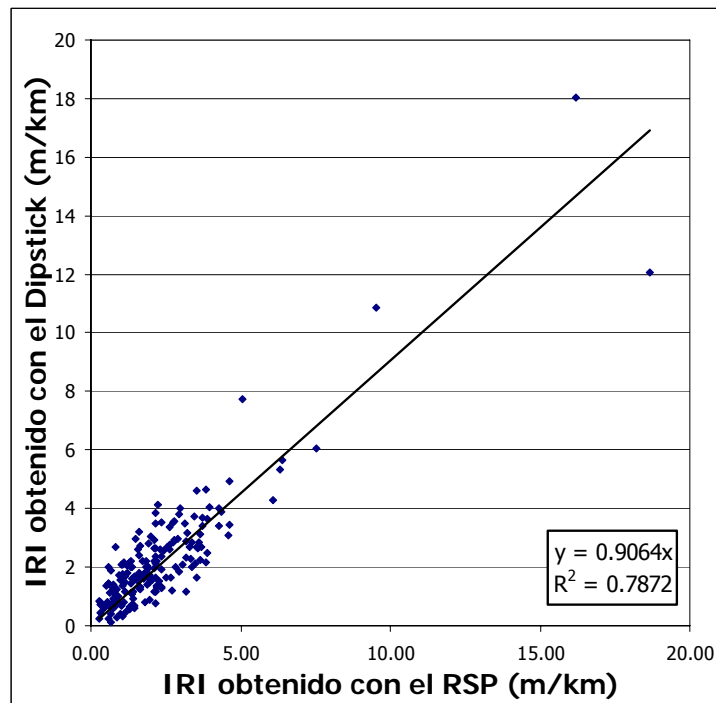


Figura 17: Comparación entre Índice Regularidad Internacional obtenido del Dipstick y del perfilómetro inercial RSP Mark III

3.2 Variación del IRI según la longitud de evaluación

Como se mencionó anteriormente, cuando se habla del valor del IRI de una carretera es necesario añadir cada qué longitud se determina dicho valor, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. Habitualmente el valor unitario más utilizado es cada 250 mm y el valor global de referencia dependerá de cada país o agencia de transporte, tal y como se mostró en Tabla 2. Es interesante calificar una carretera por sus valores cada 100 m, pero a veces también lo es obtener los valores cada 5, 20, 50, 200 metros o por el contrario cada kilómetro o cada tramo objeto de análisis.

Es necesario recordar que intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de irregularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de IRI satisfactorios. Por otra parte la utilización de intervalos de longitud menores para la determinación del IRI puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

Con la finalidad de evaluar lo anterior se consideró de interés analizar un kilómetro de una carretera. Para esto, se realizó la medición del Índice de Regularidad Internacional de un tramo, con un perfilómetro inercial Mark III de la marca Dynatest (ver Figura 12), configurando el ensayo para almacenar: datos de IRI cada 5 metros, y datos del perfil longitudinal cada 25 mm (se selecciona este intervalo pues es la resolución mínima que tiene este equipo en particular, que según la norma ASTM E950 clasifica como un equipo Clase 1). Todos estos resultados fueron guardados en un formato de archivo ERD, esto debido a que este formato almacena directamente los datos de las elevaciones del perfil longitudinal al intervalo solicitado, lo cual permite análisis posteriores del perfil a diferentes intervalos de longitud del cálculo del IRI. El formato ERD fue desarrollado por la División de Investigación en Ingeniería (*Engineering Research Division, ERD*) del Instituto de Investigaciones de Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) para facilitar los análisis automáticos de datos de simulación, medición experimental, entre otros.

Los archivos ERD obtenidos fueron procesados posteriormente con los programas:

- RoadRuf: software que contiene un conjunto integrado de herramientas para interpretación de regularidad de datos del perfil longitudinal, desarrollado por el

Instituto de Investigaciones en Transportes de la Universidad de Michigan (UMTRI) con fondos de la *Federal Highway Administration (FHWA)*.

- PROVAL (*Profile Viewing and AnaLysis*): software que permite al usuario observar y analizar perfiles de pavimentos de diferentes maneras. Fue desarrollado por Transtec Group a través de la *Federal Highway Administration (FHWA)* y de la *Long Term Pavement Performance Program (LTPP)*.

Como primer paso se compararon los resultados reportados directamente con el perfilómetro inercial cada 5 metros con los que se obtienen al procesar los datos de elevaciones almacenados en el archivo ERD en un intervalo cada 5 metros. Las figuras Figura 18 y Figura 19, muestran la comparación de los resultados obtenidos.

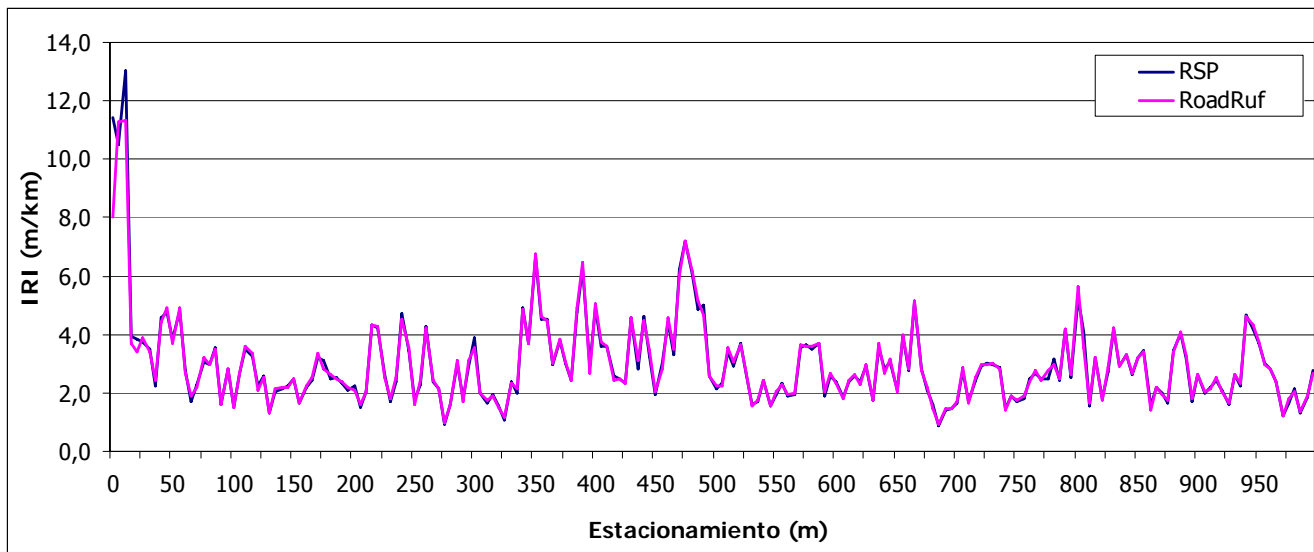


Figura 18: Índice Regularidad Internacional obtenido con el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf

Como se puede observar en la Figura 18, en los primeros 20 m se observan diferencias entre los valores de IRI obtenidos por ambos métodos, lo cual nuevamente confirma que se requiere de aproximadamente 20 m para inicializar las variables del método de cálculo del IRI. Finalmente, una vez que se han inicializado las variables se puede observar la correspondencia de los datos restantes, lo cual es más evidente en la Figura 19, en la cual se hace la comparación entre los resultados obtenidos. En este caso se obtiene que la ecuación de la recta de mejor ajuste tiene una pendiente de 0.9793 con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9588$; donde, sería de esperar una pendiente y

coeficiente de correlación igual al valor de la unidad, sin embargo ambos valores son muy altos y cercanos a 1, lo que confirma la validez de los resultados obtenidos de ambas maneras.

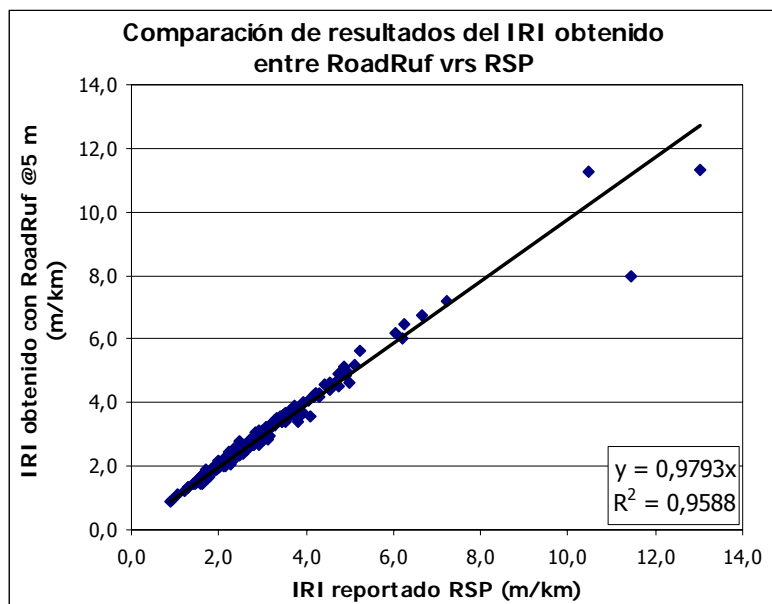


Figura 19: Comparación de resultados de IRI obtenido entre el perfilómetro inercial RSP Mark III y con el programa RoadRuf

Como siguiente paso del análisis se procedió a utilizar los datos obtenidos con el perfilómetro inercial cada 5 metros; en esta ocasión se usaron estos valores y se promediaron los resultados a diferentes intervalos, por ejemplo 20, 50, 100 y 200 metros. Estos resultados fueron comparados con los que se obtienen al procesar los datos de elevaciones almacenados en el archivo ERD a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, respectivamente. La Tabla 3 y la Figura 20 muestra los resultados de IRI obtenidos cuando se realizan variaciones en la longitud de evaluación y la Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24 muestran las comparaciones entre los resultados.

Tabla 3. Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos															
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m											
0	5	11.4	9.7	6.1	4.5	3.5	8.0	8.6	5.7	4.3	3.4											
5	10	10.5					11.3															
10	15	13.0					11.3															
15	20	4.0	3.3				3.7	3.3				3.4										
20	25	3.8					3.9					2.5										
25	30	3.7					3.4															
30	35	3.5	4.5				2.9	4.5				3.5	4.4	2.9	4.3	3.4						
35	40	2.2											4.9									
40	45	4.6											3.7									
45	50	4.8	4.9										2.5									
50	55	3.8	2.7																			
55	60	4.8	1.9																			
60	65	2.8	2.5	2.9	4.5	3.5			2.2	2.9	4.3		3.4									
65	70	1.7							3.2													
70	75	2.3							2.9													
75	80	3.1	2.7						2.4								3.5	2.7	2.9	2.9	4.3	3.4
80	85	3.0					3.5															
85	90	3.6					1.6															
90	95	1.6	2.7				2.4	3.5				2.7		2.8	2.9	4.3			3.4			
95	100	2.8												2.9								
100	105	1.5												2.7								
105	110	2.7	2.7											2.3								
110	115	3.5		3.6																		
115	120	3.3		3.4																		
120	125	2.3	2.0	2.4	3.5	2.7				2.1	2.9		4.3									
125	130	2.6							2.5													
130	135	1.3							1.3													
135	140	2.0	2.1						2.5	4.5							3.5	2.1		2.9	4.3	3.4
140	145	2.1					2.2															
145	150	2.2					2.2															
150	155	2.5	2.7				2.4	3.5				2.7			2.5	2.9		4.3	3.4			
155	160	1.7												1.7								
160	165	2.2												2.2								
165	170	2.4	2.7											2.4	3.5							
170	175	3.2		3.4																		
175	180	3.1		2.8																		
180	185	2.5	2.4	2.5	4.5	3.5					2.6		2.9									
185	190	2.5							2.5													
190	195	2.4							2.4													
195	200	2.1	2.2																			

Tabla 3 (cont.) Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos							
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m			
200	205	2.2	2.5	2.9	2.6	3.0	2.1	2.5	2.9	2.6	3.0			
205	210	1.5					1.6							
210	215	2.0					2.0							
215	220	4.3					4.3							
220	225	4.2	2.7				4.3	2.8				2.5		
225	230	2.6					1.8							
230	235	1.7					2.5							
235	240	2.4	3.0				4.5	3.0				3.6		
240	245	4.7					1.6							
245	250	3.4					2.4							
250	255	1.7		4.2										
255	260	2.3	2.4	2.3	3.0	2.4	2.3	3.4	3.0					
260	265	4.3								2.4				
265	270	2.4								2.1				
270	275	2.1								1.0				
275	280	0.9	2.3			1.6				2.4	3.1			
280	285	1.6				3.1								
285	290	3.0				1.7								
290	295	1.8				3.1								
295	300	2.9	2.4			2.5				3.3	3.6	2.5	3.4	3.0
300	305	3.9												
305	310	2.0		1.8										
310	315	1.7		1.9										
315	320	1.9	1.7	1.5	1.8		4.9							
320	325	1.6		1.1										
325	330	1.1		2.3										
330	335	2.4		2.2										
335	340	2.0	4.9	4.2	3.3		5.0	4.2	3.4		3.0			
340	345	4.9												
345	350	3.7				3.7								
350	355	6.7				6.8								
355	360	4.5	3.6			4.6	3.6			4.5				
360	365	4.5				3.0								
365	370	3.0				3.9								
370	375	3.8				3.0								
375	380	3.0	4.1			2.4	4.1			4.9				
380	385	2.4				6.4								
385	390	4.8		2.7										
390	395	6.2												
395	400	2.9												

Tabla 3 (cont.) Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos								
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m				
400	405	4.9	3.7	3.5	4.0	3.3	5.0	3.7	3.5	4.0	3.3				
405	410	3.6					3.7								
410	415	3.6					2.4								
415	420	2.6					2.5								
420	425	2.5	3.0				4.5	2.6				2.3	3.1	4.5	3.3
425	430	2.3										4.6			
430	435	4.6										3.1			
435	440	2.8										4.5			
440	445	4.6	3.2	4.5			2.6	4.5	3.2			4.5	3.3		
445	450	3.3						3.5							
450	455	1.9						2.0							
455	460	3.0						2.8							
460	465	4.4	5.3	4.5	2.6	4.6	5.3	4.5	3.3						
465	470	3.3				3.5									
470	475	6.2				6.0									
475	480	7.2				7.2									
480	485	6.1	4.6	2.6	2.6	6.2	4.6	2.6	3.3						
485	490	4.9				5.1									
490	495	5.0				4.7									
495	500	2.6				2.6									
500	505	2.2	2.7	2.5	2.6	3.3	2.2	2.8	2.5	2.6					
505	510	2.4					2.3								
510	515	3.4					3.6								
515	520	2.9					3.1								
520	525	3.7	2.4				2.6	2.6			3.6	2.4	2.5	3.3	
525	530	2.6									2.7				
530	535	1.6									1.6				
535	540	1.7									1.8				
540	545	2.5	2.1	2.6	2.6	2.4	2.1	2.6	3.3						
545	550	1.6				1.6									
550	555	1.9				2.1									
555	560	2.3				2.3									
560	565	1.9	2.8	2.7	2.6	1.9	2.8	2.8	3.3						
565	570	2.0				2.0									
570	575	3.6				3.7									
575	580	3.6				3.6									
580	585	3.5	2.9	2.7	2.6	3.6	3.0	2.8	3.3						
585	590	3.7				3.7									
590	595	1.9				2.0									
595	600	2.6				2.7									

Tabla 3 (cont.) Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferente intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos				
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m
600	605	2.4	2.3	2.6	2.5	2.5	2.3	2.3	2.6	2.5	2.5
605	610	1.9					1.8				
610	615	2.4					2.4				
615	620	2.6					2.6				
620	625	2.4	2.7				2.3				
625	630	2.9					3.0				
630	635	1.7					1.7				
635	640	3.5					3.7				
640	645	2.8	3.0				2.7				
645	650	3.0					3.1				
650	655	2.1		2.0							
655	660	3.9		4.0							
660	665	2.8	3.2	2.8							
665	670	5.1		5.2							
670	675	2.8		2.8							
675	680	2.1		2.2							
680	685	1.6	1.4	1.5							
685	690	0.9		0.9							
690	695	1.4		1.5							
695	700	1.5		1.5							
700	705	1.7	2.1	2.4	2.5	1.7	2.2	2.4	2.5	2.5	
705	710	2.8				2.9					
710	715	1.7				1.7					
715	720	2.4				2.5					
720	725	2.9	2.9			2.9					
725	730	3.0				3.0					
730	735	3.0				3.0					
735	740	2.9				2.8					
740	745	1.4	1.7			1.4					
745	750	1.9				1.9					
750	755	1.7		1.7							
755	760	1.8		1.9							
760	765	2.5	2.5	2.4							
765	770	2.7		2.6	2.8						
770	775	2.5			2.5						
775	780	2.5			2.8						
780	785	3.2	3.1		2.9						
785	790	2.4		2.5							
790	795	4.2		4.2							
795	800	2.5		2.6							

Tabla 3 (cont.) Variación en el valor del IRI (m/km) según la longitud de evaluación

Estación inicial (m)	Estación final (m)	Valores de IRI promediando resultados del RSP a diferentes intervalos					Valores de IRI calculado con el RoadRuf a diferentes intervalos				
		Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m	Cada 5 m	Cada 20 m	Cada 50 m	Cada 100 m	Cada 200 m
800	805	5.2	3.5	3.2	2.9	2.7	5.6	3.5	3.2	2.9	2.7
805	810	4.1					3.6				
810	815	1.6					1.6				
815	820	3.2					3.2				
820	825	1.8	2.9	2.6	2.7	2.7	1.7	1.8	2.7	2.7	
825	830	2.7					2.9				
830	835	4.2					4.2				
835	840	2.9	3.1	2.6	2.7	2.7	2.9	3.1	2.7	2.7	
840	845	3.3					3.3				
845	850	2.6					2.7				
850	855	3.2	1.9	2.6	2.7	2.7	3.2	1.8	2.7	2.7	
855	860	3.4					3.4				
860	865	1.6					1.4				
865	870	2.2					2.2				
870	875	2.0	3.1	2.6	2.7	2.7	2.0	3.1	2.7	2.7	
875	880	1.7					1.7				
880	885	3.4					3.4				
885	890	4.0	2.3	2.7	2.5	2.7	4.1	2.1	2.3	2.7	
890	895	3.2					3.3				
895	900	1.7					1.8				
900	905	2.6					2.6				
905	910	2.0	2.1	2.7	2.5	2.7	2.0	3.9	2.5	2.7	
910	915	2.2					2.1				
915	920	2.4					2.5				
920	925	2.1	3.9	2.3	2.5	2.7	2.0	2.1	2.3	2.7	
925	930	1.6					1.7				
930	935	2.6					2.6				
935	940	2.3					2.4				
940	945	4.7	2.0	2.3	2.5	2.7	4.6	2.0	2.3	2.7	
945	950	4.2					4.3				
950	955	3.7					3.7				
955	960	3.0	2.0	2.3	2.5	2.7	3.0	2.0	2.3	2.7	
960	965	2.8					2.8				
965	970	2.4					2.4				
970	975	1.2					1.2				
975	980	1.7	2.0	2.3	2.5	2.7	1.8	2.0	2.3	2.7	
980	985	2.1					2.0				
985	990	1.3					1.3				
990	995	1.8	2.8	2.3	2.5	2.7	1.9	2.0	2.3	2.7	
995	1000	2.8					2.7				
Media		2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.97	2.97	2.97	2.97	2.97
Desviación		1.56	1.28	0.96	0.74	0.40	1.45	1.16	0.88	0.69	0.37
Coef. de variación		0.52	0.43	0.32	0.25	0.14	0.49	0.39	0.30	0.23	0.13
IRI característico		4.54	4.26	3.94	3.72	3.39	4.42	4.13	3.85	3.66	3.34

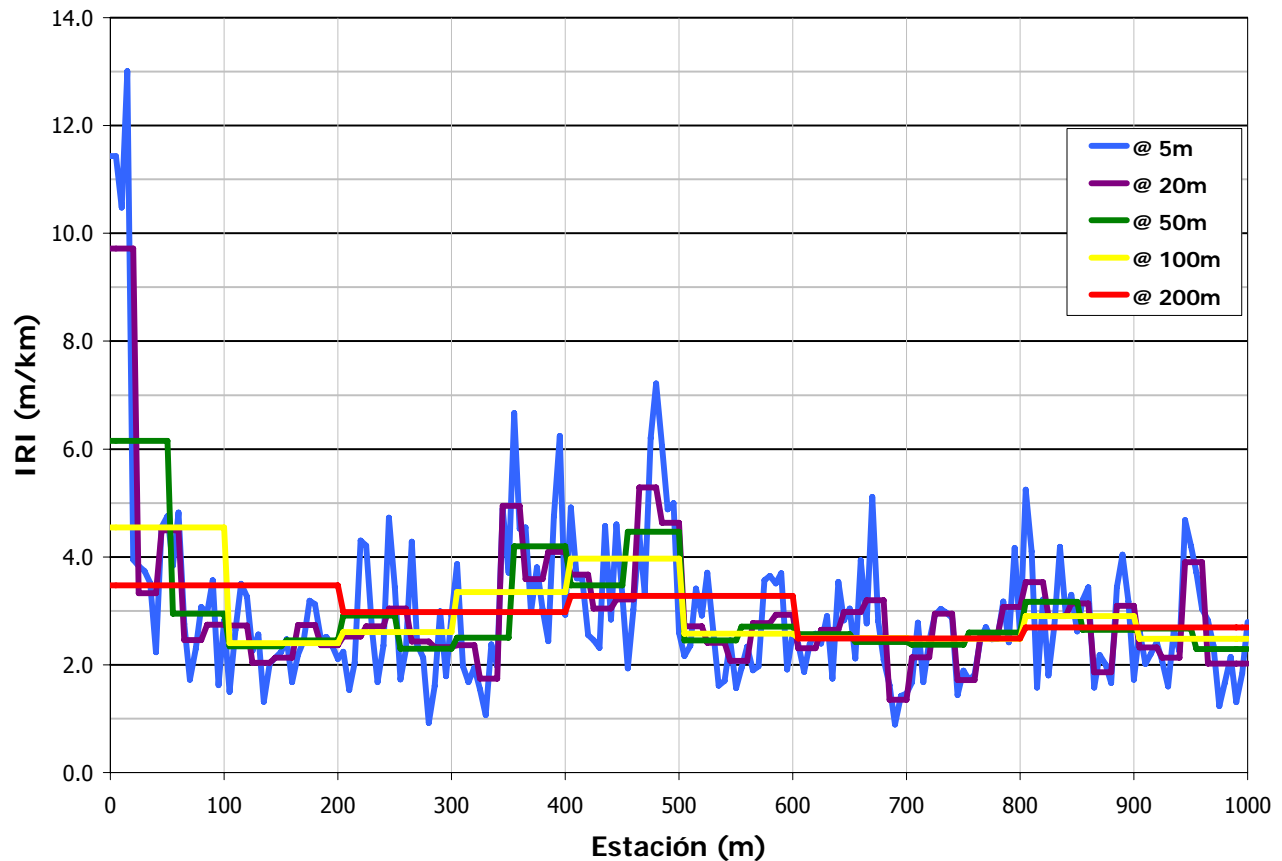


Figura 20: Variación en el valor del IRI según la longitud de evaluación

Como se puede observar de la tabla y de la figura anterior las variaciones en la longitud del intervalo de medición del IRI, tiene incidencia directa en los resultados, de forma tal que los valores se suavizan como consecuencia del efecto de promediar. Lo cual es bastante evidente, al observar los primeros 200 m del tramo, en el cual se dan valores de IRI mayores a 10 y valores de IRI inferiores a 2, cuando el intervalo de evolución es igual a 5 m. Por su parte al calcular el valor del IRI en un longitud de evaluación de 200m, el efecto de promediar los valores dentro de este tramo muestra un valor de IRI igual a 3.5, lo cual puede resultar en la obtención inadecuada de valores de IRI satisfactorios en algunos casos.

A demás, los resultados de la media y la desviación estándar mostrados al final de la tabla permiten comprobar que la media estadística para todo el tramo se mantiene y la desviación típica disminuye según se va aumentando la longitud de evaluación. Como se observa la desviación típica es de 1.56 cuando se calcula con datos cada 5 metros y se reduce a 0.40 cuando se hace con

datos cada 200 metros. Lo mismo sucede con el coeficiente de variación o cociente entre la desviación y la media, los cuales se reducen al aumentar la longitud de evaluación.

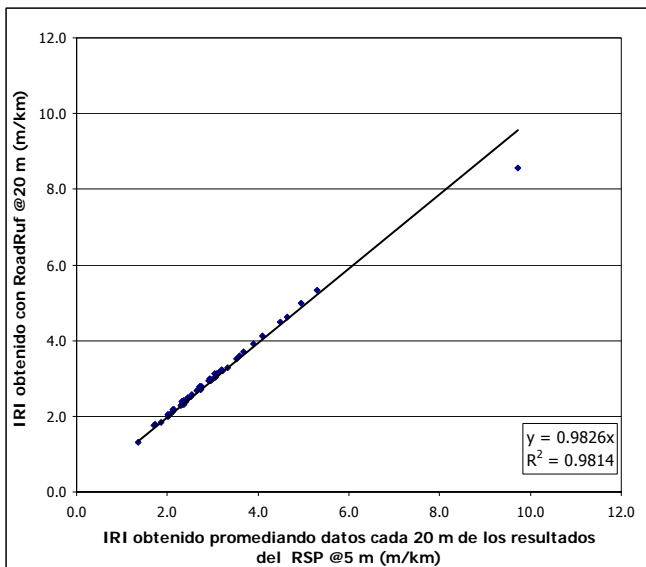


Figura 21: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 20 m

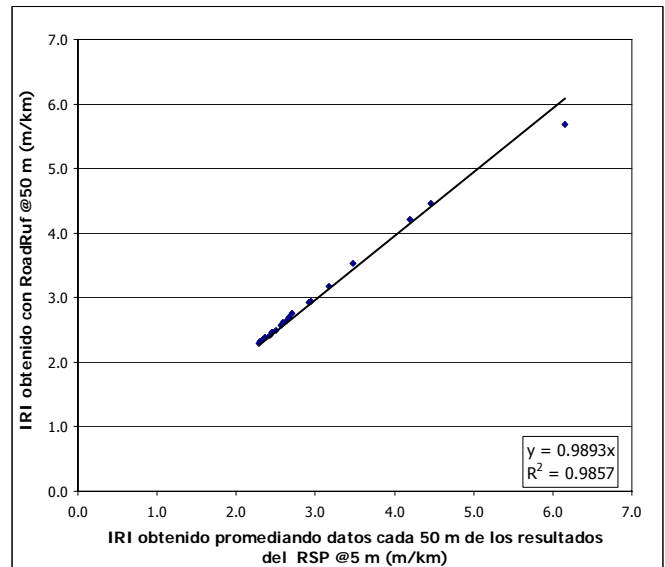


Figura 22: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 50 m

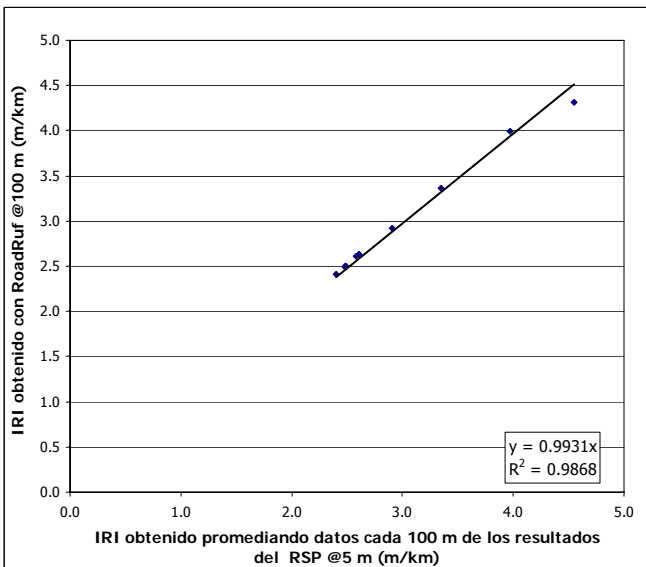


Figura 23: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 100 m

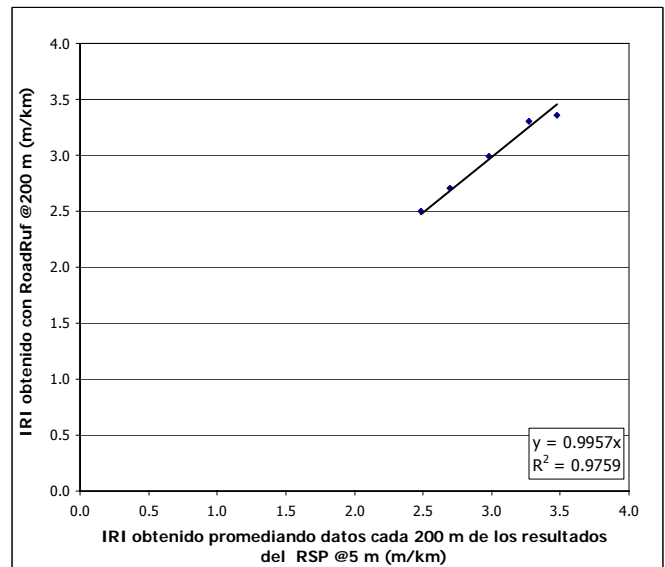


Figura 24: Comparación de resultados de IRI obtenido cada 200 m

Cuando hacemos la comparaciones entre los resultados de simplemente promediar los resultados obtenidos con el RSP a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, con los resultados obtenidos con el programa RoadRuf al procesar los datos de elevaciones a los intervalos de 20, 50, 100 y 200 metros, se puede observar que existe una muy buena correspondencia entre los resultados, cuyos coeficientes de correlación, R^2 son muy altos de aproximadamente 0.98 en todos los casos, lo

cual es una muestra de dos aspectos muy importantes en lo que respecta al cálculo del IRI; aspectos de los cuales ya se ha hecho mención anteriormente, tales como:

- El IRI es el valor medio de los IRI unitarios o puntuales que se obtienen. De esta manera es posible promediar los valores de IRI de longitudes de evaluación más pequeños para obtener el valor de IRI en longitudes de evaluación mayores.
- Cuando se cuenta con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal, es posible determinar el IRI a cualquier intervalo de longitud de evaluación, empleando programas adecuados como el RoadRuf o PROVAL, ya que el IRI es el resultado de la aplicación de un modelo matemático a la línea de perfil.

3.3 Efecto de singularidades en la medición y cálculo del IRI

La correcta terminación de los pavimentos es de gran importancia para la comodidad, seguridad y costos de operación de los usuarios de los caminos, factor que además de tener una gran influencia en la duración de éstos, repercute en los costos del mantenimiento vial.

Como se mencionó anteriormente el IRI es un indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento y representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $IRI = 0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

El perfil real de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanzar valores de $IRI = 0$ es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito.

Debido a que IRI involucra la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el perfil longitudinal existente, es un hecho que se pueden presentar ciertas singularidades que pueden afectar la medición del IRI. La metodología de evaluación para determinar la regularidad IRI de los pavimentos LNV 107-2000, empleada por la Dirección de Vialidad en Chile define a una singularidad como:

"Cualquier alteración del perfil longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor del IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas

se pueden citar puentes, badenes, tapas de alcantarillas, cuñas, cruces de calles y otras, que por diseño geométrico alteren el perfil del camino"

De igual manera, esta misma metodología define un área de influencia asociada a la singularidad, como sigue:

"El largo de una singularidad corresponde a la suma de su longitud más su área de influencia que son 40 m hacia delante en el sentido de la medición"

Tomando en consideración estos aspectos, se procedió a proponer y simular perfiles longitudinales teóricos que fueron guardados en formato ERD y procesarlos posteriormente con los programas RoadRuf y PROVAL. Para cada uno de los perfiles propuestos se le incluyeron singularidades posibles que pueden presentarse en las carreteras nacionales, y de esta manera calcular el IRI del tramo y evaluar la magnitud en el valor del IRI de la singularidad y su área de influencia; así como también evaluar como se refleja la singularidad en la longitud de evaluación.

Como se observa en la Figura 25 y Figura 26, se realizó la simulación del efecto de juntas de construcción con acabados deficientes. En el primer caso, se supuso una junta entre dos tramos consecutivos de 50 metros cada uno, en la cual en una longitud de 5 cm se produjo una depresión de 1.5 cm de profundidad. En el segundo caso se supuso que entre dos tramos consecutivos de 50 metros cada uno, existía una diferencia de elevación de 1.5 cm, con una transición de solamente 2.5 cm, producto de problemas constructivos en la conformación de la junta de construcción.

En ambos casos se tiene singularidades muy puntuales en el tramo simulado que generan un incremento en el valor del IRI. Sin embargo, este incremento es aún más evidente cuando se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos, así por ejemplo un intervalo de longitud de evaluación cada 5 metros permite identificar claramente el punto donde se encuentra la singularidad; sin embargo, un intervalo de medición tan pequeño definirá valores de IRI relativamente altos para particularidades tan pequeñas como ésta. Es evidente también, que conforme aumentamos la longitud de evaluación, los resultados se suavizan por lo que se obtienen valores de IRI satisfactorios, además de que se imposibilita determinar el sitio donde se presentan las particularidades. Finalmente, la Figura 25 y Figura 26, muestran claramente el área de influencia de la singularidad, la cual corresponde a 40 metros después del sitio donde se presentó la particularidad, fenómeno que deberá considerarse cuando se define la longitud de evaluación del IRI en el caso de la definición de una especificación.

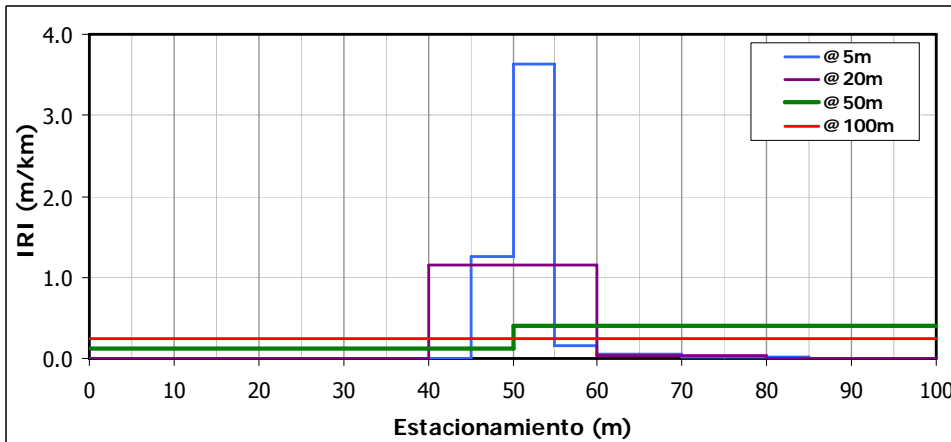
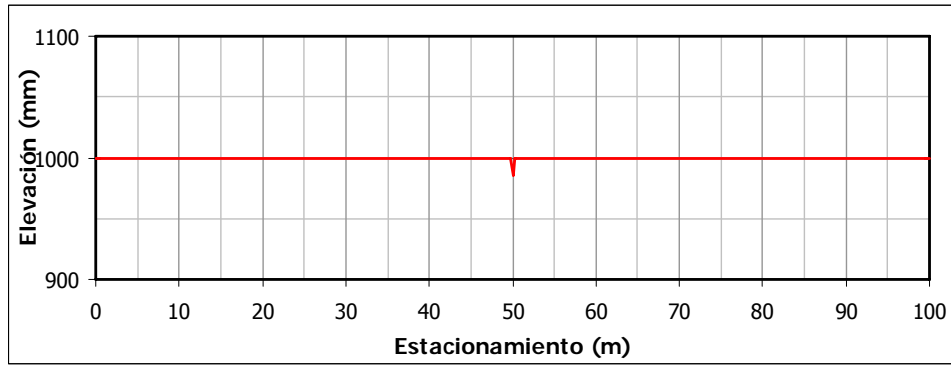


Figura 25: Simulación de una junta de construcción (ejemplo 1)

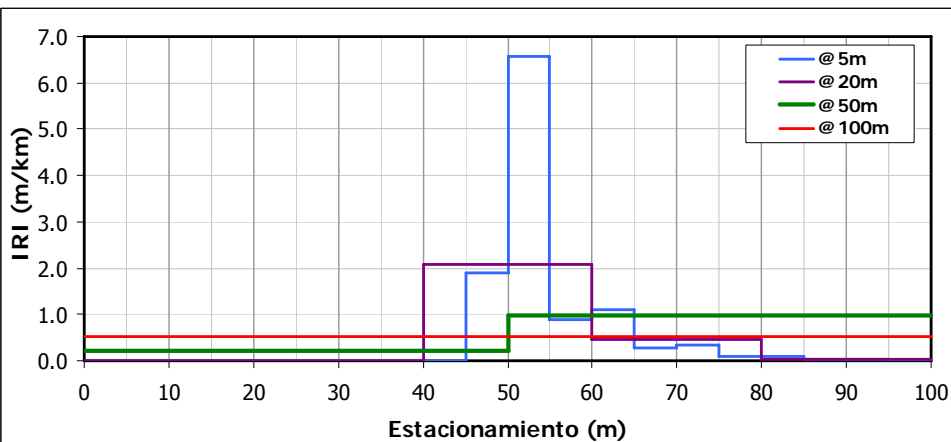
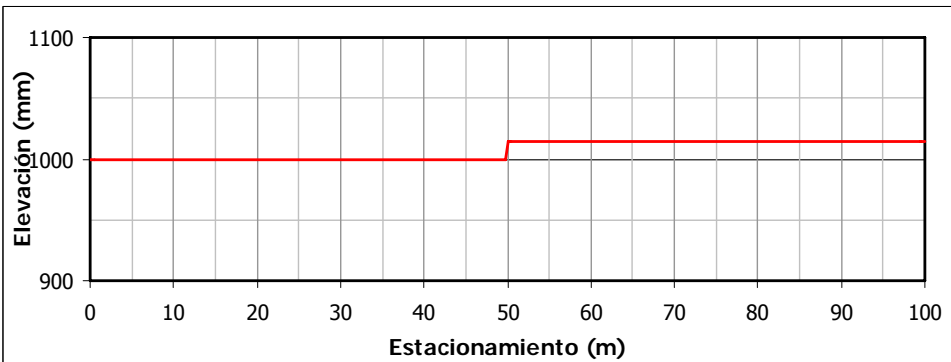


Figura 26: Simulación de una junta de construcción (ejemplo 2)

En el caso de la Figura 27 y Figura 28, se realizó en el primer caso la simulación del efecto de un actividad de bacheo con un mal acabado de aproximadamente 10 metros de longitud, en el cual existe una sobreelevación respecto a la superficie del pavimento de 2.5 cm. En el segundo caso se realiza la simulación de una depresión o hueco de 2.5 cm de profundidad y 10 m de longitud.

Como primera observación importante, se puede notar que los valores de IRI para cualquier intervalo o longitud de evaluación para ambos casos son exactamente iguales. Esto debido a que el IRI es un índice que mide los desplazamientos de los movimientos verticales no deseados atribuibles a la irregularidad del camino, independientemente de si se trata de una sobreelevación o no. Nuevamente las singularidades generan un incremento en el valor del IRI, el cual es más evidente cuando se utilizan intervalos o longitudes de evaluación más cortos. Otra vez, conforme aumenta la longitud de evaluación, los resultados de los valores de IRI se reducen e imposibilitan determinar el sitio donde se presentan las particularidades. En este caso es más sencillo ver los 40 metros del área de influencia de IRI de la singularidad después del sitio donde se presentó la particularidad, especialmente cuando se emplean intervalos o longitud de evaluación pequeños. Finalmente, se notan valores de IRI superiores a 12 m/km (que según la escala del Banco Mundial corresponde a un camino intransitable), cuando se emplean longitudes de evaluación muy pequeños.

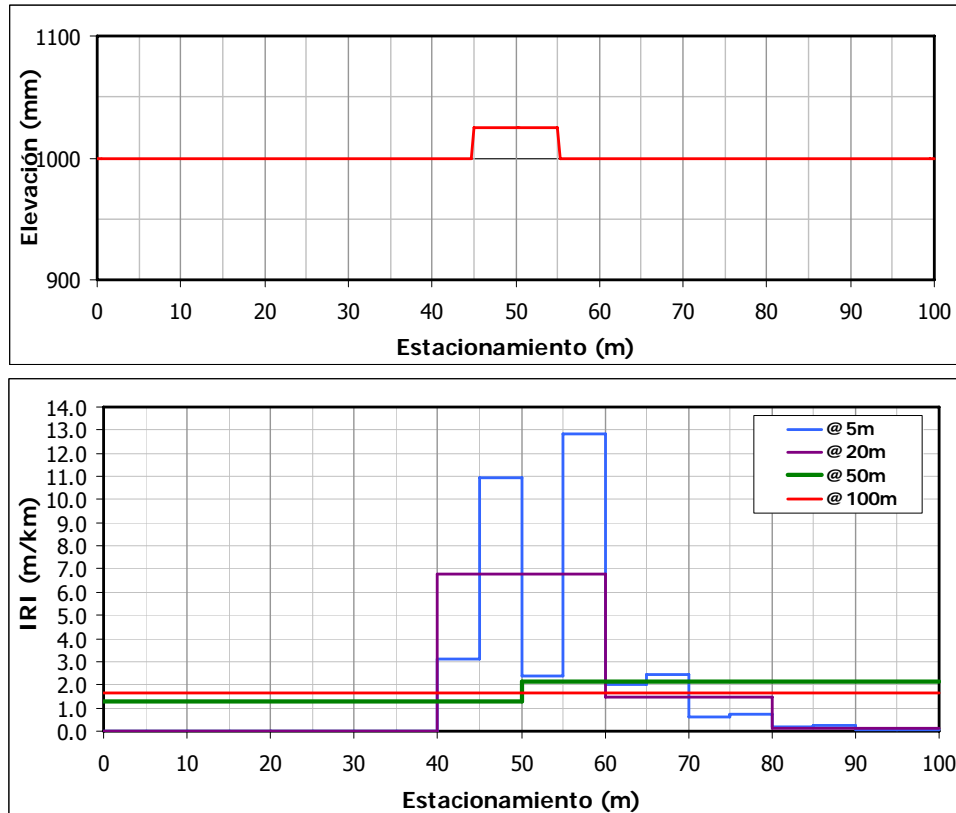


Figura 27: Simulación de un bache de 10 m de longitud mal cerrado

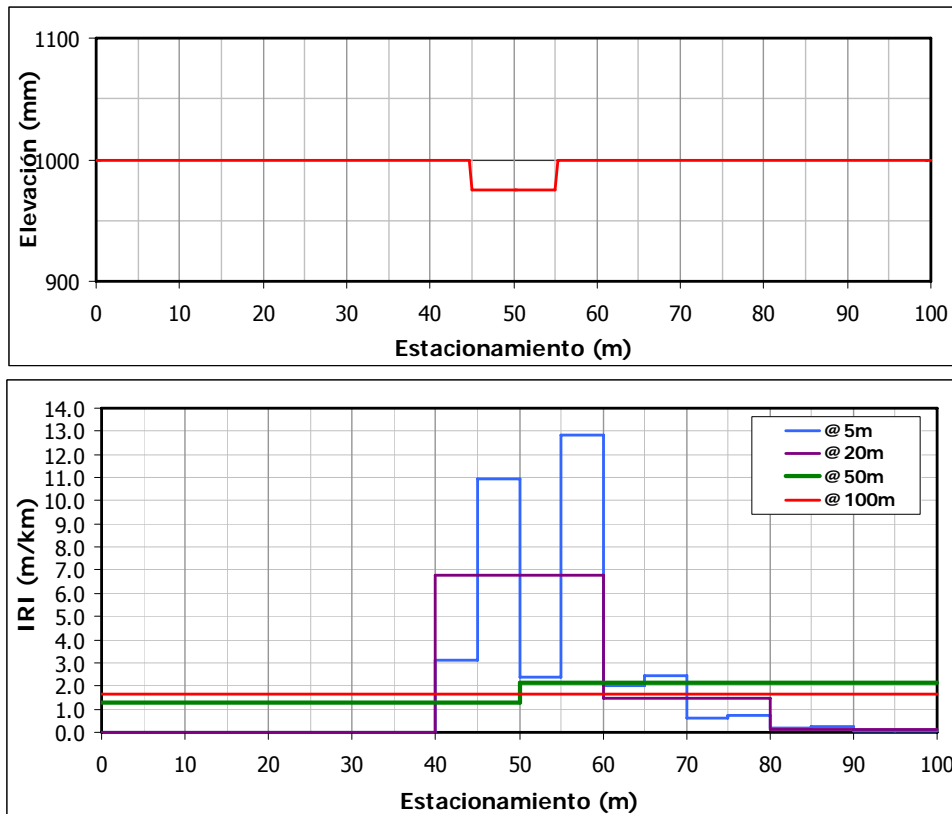


Figura 28: Simulación de un hueco de 2.5 cm de profundidad y 10 m de longitud

La Figura 29 y la Figura 30 simulan la combinación de actividades bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes, con la finalidad de evaluar la influencia que tendrán en el valor del IRI. En ambos casos se considera el efecto de actividades de bacheo con malos acabados de aproximadamente 5 metros de longitud, en el cual existe una sobrelevación respecto a la superficie del pavimento de 2.5 cm. En el primer caso, se consideran baches perfectamente planos en su superficie y en el segundo caso se considera una forma más “real” de la superficie del bache con cierta concavidad del mismo. Las juntas de construcción son similares a las que se muestran en la Figura 26 y las dimensiones de los huecos son las que se muestran en las figuras.

Nuevamente las singularidades generan un incremento en el valor del IRI. En el caso de intervalos de evaluación cortos los valores de IRI son extremadamente altos, incluso superando valores de IRI de 40 m/km. Se notan valores de IRI superiores o cercanos 12 m/km para todas las longitudes de evaluación, que según la escala del Banco Mundial corresponde a un camino intransitable, lo que denota condiciones de confort y seguridad inadecuadas, además de se esperarían deterioros prematuros y mayores costos de mantenimiento.

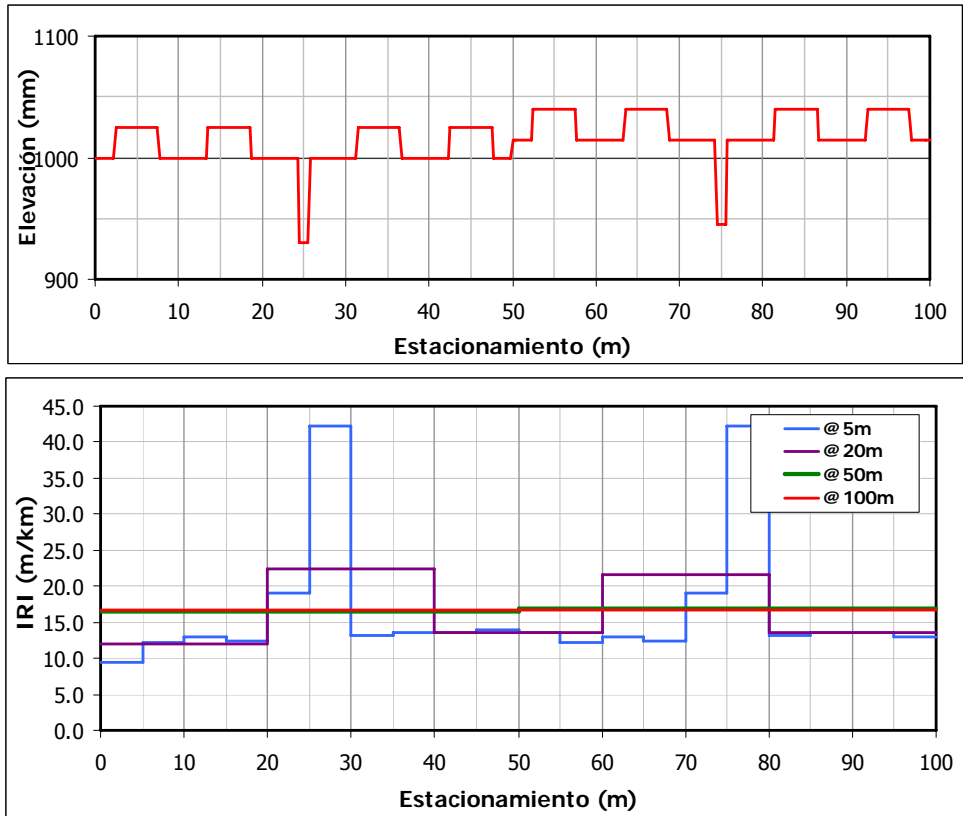


Figura 29: Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 1)

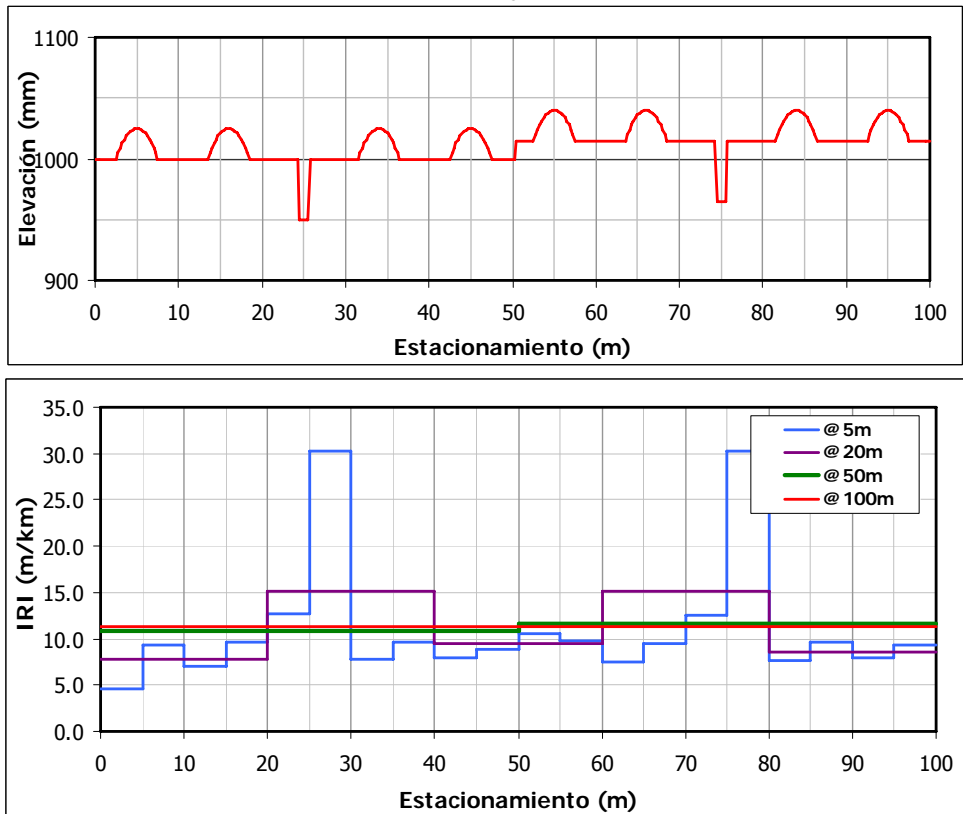


Figura 30: Simulación de combinación de bacheo extensivo, huecos y juntas de construcción deficientes (ejemplo 2)

CAPÍTULO 4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI) EN COSTA RICA

4.1 Procedimiento utilizado en Costa Rica para la medición del IRI

En Costa Rica, la medición de la regularidad de los pavimentos, para efectos de control de calidad y recepción de algunos proyectos de la infraestructura vial se realiza actualmente a través del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Sin embargo, las mayores aplicaciones del IRI que se han venido realizando son las campañas de Evaluación de la Red Vial Nacional 2004, 2006 y actualmente la 2008. Dichas campañas se han venido realizando con un perfilómetro inercial láser, marca Dynatest, modelo 5051 Mark III Road Surface Profiler (RSP), propiedad del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR); con el cual se puede recolectar información del estado de la carretera con gran exactitud en las mediciones de perfil, tanto longitudinal como transversal. El RSP obtiene estas mediciones, las despliega y almacena; así como también calcula los índices de regularidad superficial, medición de ahuellamiento y registra la velocidad de operación del equipo (ver Figura 12)

El RSP tiene instalados tres dispositivos láser localizados, uno en la línea central de la barra del RSP y los otros dos en los extremos, que corresponden a cada una de las huellas del vehículo, como se aprecia en la Figura 31. Estos dispositivos miden, por triangulación, la distancia entre la barra del RSP y la carretera. Los láser ubicados en los extremos, se encuentran a 838 mm del centro de la barra. En los extremos, el RSP posee dos acelerómetros que se encargan de convertir la aceleración vertical en una medida de referencia inercial.

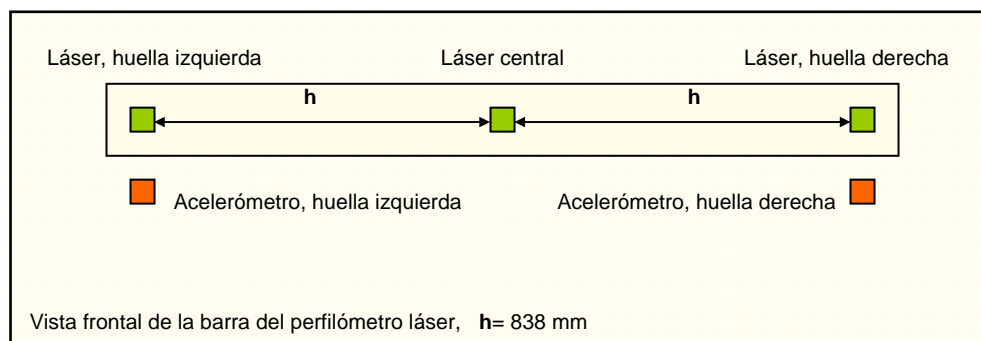


Figura 31: Posición de sensores en la barra del perfilómetro láser

El RSP tiene un dispositivo de medición de distancia (distance measurement, DMI) con resolución de 1 mm, con el que se establecen las mediciones longitudinales ó intervalos de medición (como por ejemplo: @ 100 m, @ 200 m, etc.).

El proceso de medición del Índice de Regularidad Internacional se basa en las Normas de ASTM E 950 "*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*", la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM E 1170 "*Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces*", la cual abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera.

En el caso de la Evaluación de Red Vial Nacional los resultados del IRI están dados en tramos de 100 metros de longitud, y se reporta el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser; esto debido a que estos sensores son los que toman los datos de la huella de rodamiento de los vehículos en la carretera. De esta manera se reporta el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, *MRI*) el cual según se había mencionado anteriormente, constituye el IRI promedio de las huellas izquierda y derecha de un vehículo; y se expresa en unidades de mm/m o m/km, tal y como se puede encontrar en lo indicado en la especificación AASHTO PP37-02 "Estándar Practice for Quantifying Roughness of Pavements".

En el caso de proyectos nuevos el CR-2002, "Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes en Costa Rica", establece que:

El control de IRI (índice de rugosidad internacional) se realizará por sectores homogéneos, correspondientes a un mismo tipo de superficie de ruedo. No se considerarán puentes, vados u otras singularidades que afecten la medición. Asimismo, no se exigirá este control para carpetas sobre pavimentos existentes, excepto cuando en el proyecto se establezcan cotas de rasante para esos recapados, así como en vías urbanas y en vías con una velocidad de diseño menor o igual a 60 Km/h, y en curvas con radios menores o iguales a 300 m. Se medirá en forma continua en tramos de 200 metros, o fracción, en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 200 m, y se informará el IRI (m/Km) con un decimal.

A continuación se mencionan algunos proyectos en los cuales se ha solicitado el cumplimiento de del Índice de Regularidad Internacional:

- Ruta 18. Sección Limonal – Tempisque: El valor máximo aceptable será de 2.5 m/km una vez concluida la operación de Reconstrucción y Mejoramiento.
- Ruta 21. Sección Pavones-Intersección Corozal. San Rita-Jicaral-Lepanto-Playa Naranjo II: El valor máximo aceptable será de 2.5 m/km una vez concluida la operación Mejoramiento.
- Ruta 23. Sección Interamericana-Caldera: Corresponde a lo expresado en el CR-2002, en donde la evaluación del IRI se realizará tomando el promedio de los valores de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable si todos los promedios consecutivos de cinco valores de IRI tienen un valor igual o inferior a 2,0 m/km, y ninguno de los valores individuales supera 3,0 m/km.

4.2 Propuesta para la determinación del IRI en Costa Rica

Como se ha mencionado anteriormente el IRI es un indicador independiente del equipo de medida. Depende únicamente de la medida de los datos de entrada de la elevación perfil longitudinal. Al existir diferentes equipos para la medición del perfil longitudinal, deberá seguirse los procedimientos y recomendaciones dadas por el fabricante. A continuación se mencionan algunas de normas relacionadas con la determinación de la regularidad de los pavimentos:

- ASTM E 1170 *"Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces"*
- ASTM E 950 *"Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference"*
- ASTM 867 *"Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems"*
- ASTM E 1364 *"Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method"*

- ASTM E 1274 *"Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph"*
- ASTM E 1926 *"Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements"*
- ASTM E 1082 *"Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness"*
- AASHTO PP 37-02 *"Quantifying Roughness of Pavements"*

De igual manera para la medición de la regularidad debe considerarse lo establecido en el Apéndice E del Highway Performance Monitoring System Field Manual ("Measuring Pavement Roughness") del Office of Highway Policy Information de la FHWA, el cual menciona que los valores de IRI deben ser obtenidos cuando existan buenas condiciones climáticas, preferiblemente cuando la superficie de la carretera se encuentre seca. Así mismo, la medición deberá determinarse en sectores homogéneos, que corresponden a un pavimento de estructuración uniforme y que no es dividido por puentes, líneas férreas, cruces de calles y otros que puedan alterar el perfil longitudinal del camino e incrementar el valor del IRI.

Al permitirse el uso de cualquier tipo de equipo se sugiere imitar el ejemplo de la provincia de Ontario, Canadá, en el cual la Administración ha establecido un circuito de tramos de control, donde se ha realizado la medición del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Para los cuales cualquier contratista deberá comparar y verificar sus resultados para certificar su equipo de medición como apto para su uso en la medición del IRI. Los procedimientos de verificación son similares a los que se realizaron en la presente investigación, lo cual puede convertirse en una guía preliminar para su implementación en Costa Rica.

De igual manera, se sugiere que los resultados obtenidos de las cotas de elevación del perfil longitudinal sean tomados en intervalos de 250 mm y guardados en un archivo en formato ERD. Esto debido a que, estos archivos pueden ser analizados con programas tales como el RoadRuf o el PROVAL; los cuales permiten realizar análisis posteriores de los resultados obtenidos; por ejemplo

usando otros intervalos o longitudes de evaluación, y de ser necesario permite analizar singularidades que podrían darse en el tramo evaluado.

Debe considerarse también la inicialización de las variables del modelo del cuarto de coche, por lo tanto es necesario medir el perfil al menos 20 m antes del punto de inicio del tramo, e iniciar a partir de allí el cálculo del IRI.

Para reportar los resultados de la evaluación se sugiere seguir la norma AASHTO PP37-02 "Estándar Practice for Quantifying Roughness of Pavements", en la cual se reporta el valor promedio del IRI para los sensores izquierdo y derecho del perfilómetro láser, que corresponden a las huellas de las llantas del vehículo, reportando de esta manera el Índice de Regularidad Promedio (Mean Roughness Index, *MRI*), los resultados deberán expresarse en unidades de m/km con al menos un decimal.

En el caso de evaluaciones a nivel de red, se sugiere que el intervalo o longitud de evaluación sea el expresado en la norma AASHTO PP 37-02, el cual corresponde a 100 m, acorde con muchas de las especificaciones internacionales mostradas en la Tabla 2. En el caso de evaluación de a nivel de proyecto, como criterio de aceptación de obras, tomando en consideración lo discutido para las figuras 20, 25, 26, 27, 28, 29 y 30, además de lo referente al área de influencia de una singularidad, se sugiere emplear una longitud de evaluación de 50 m. Intervalo que se considera adecuado, ya que permite identificar más claramente los tramos o puntos que presenta problemas de regularidad o que presentan alguna particularidad. Además, como se puede ver en estas figuras, cuando existe mucha dispersión en los valores de IRI, los intervalos de medición mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo valores de IRI satisfactorios. Por otro lado en el caso, en que la dispersión de los resultados es bajo, los resultados de la evaluación en intervalos de 50, 100 o 200 m son muy similares entre sí, lo que permitiría realizar comparaciones con resultados obtenidos en evaluaciones a nivel de red por ejemplo. Finalmente, es posible obtener valores de IRI a longitudes de evaluación mayores simplemente promediando los resultados del IRI calculados con longitudes de evaluación menores, tal y como se pudo inferir del apartado 3.2.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio bibliográfico, de los resultados y análisis llevados a cabo se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El IRI es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil. Depende únicamente de la calidad del perfil longitudinal.
- Para indicar un valor adecuado del IRI es necesario indicar cual es el intervalo o longitud de evaluación, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios.
- Intervalos de longitud mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo valores de IRI satisfactorios.
- En el caso de Costa Rica se sugiere que el intervalo de evaluación para el cálculo del IRI sea 50 m, para evaluación de proyectos nuevos y un intervalo más amplio para evaluación de la Red Vial Nacional 100 m.

Del estudio realizado por Townsend, denominado "Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos", se desprenden las siguientes consideraciones, en términos cualitativos, que deben tenerse para el control receptivo de proyectos:

- La presencia de desvíos durante la construcción de las obras, aseguran valores de regularidad bajos, respecto aquellas obras ejecutadas sin la presencia de éstos.
- La geometría del camino asociada a curvas verticales y horizontales, pendientes, gradientes, peraltes y otras, durante la etapa constructiva de las obras pueden afectar la adecuada terminación de los caminos en términos de obtener valores de IRI aceptables.
- La calidad y tecnología de las maquinarias, los equipos topográficos, las buenas prácticas constructivas, el adiestramiento y la capacitación de operadores, aseguran una baja regularidad.

- Según la experiencia internacional, es conveniente anticipar controles de regularidad en las capas estructurales inferiores a la superficie de rodado. La evaluación de la capacidad funcional en cada etapa de la construcción se presenta como una alternativa complementaria a las tradicionales. La evaluación por capas puede permitir corregir eventualmente diferencias en la construcción de una capa y mejorar la regularidad superficial del pavimento.
- Aumentar la vida útil de las carreteras y ahorrar millones de colones en mantenimiento depende de solo empezar a darle una mayor importancia a los procedimientos, especificaciones y control de calidad durante la colocación de las mezclas asfálticas para beneficio de los usuarios y contribuyentes.

REFERENCIAS

- Zaghoul S. (1996). Benefits of Constructing Smoother Pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 65, pp747-770
- Budras, J. (Agosto 2001). A Synopsis on the Current Equipment Used for Measuring Pavement Smoothness. Recuperado el 11 de diciembre 2007 de:
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/smoothness/rough.cfm>
- Ventura, J. Alvarenga E. (Mayo 2005). Determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. República de El Salvador
- Crespo del Río, R (Setiembre 2003). Variación del IRI según la longitud de evaluación. Área de Gestión de Infraestructura. AEPO Ingenieros Consultores. Madrid, España.
- Ningyuan, L. Marciello, F. Kazmicrowski, T. Quality Assurance Applied in Measuring Pavement Roughness of Ontario Provincial Roads. Ontario, Canadá. Recuperado el 18 de diciembre 2007 de: <http://pms.nevadadot.com/2002presentations/47.pdf>

- Canadian Strategic Highway Research Program (C-SHRP) (Julio 1999). Summary of Pavement Smoothness Specifications in Canada and Around the World. Technical Brief #16. Canada. Recuperado 18 de diciembre 2007 de: <http://www.cshrp.org/products/br-6-e.pdf>
- Townsend, E. Veliz, C. Determinación de umbrales de rugosidad (IRI) obtenido de base de datos de caminos con controles receptivos. Chile. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: http://www2.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/43EdgardoTownsendUmbralesrugosidad.pdf
- Sayer, M. (1995). On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile. Transportation Research Record, Transportation Research Board (TRB), Washington, DC. No. 1501, pp 1-12.
- Sayers, M. Karamihas, S. (Setiembre 1998). The Little Book of Profiling: Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles. University of Michigan, USA. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness>
- Awasthi, G. Singh, T. (Mayo 2003). On Pavement Roughness Indices. IE (I) Journal-CV. Recuperado el 19 de diciembre 2007 de: <http://www.ieindia.org/publish/cv/0503/may03cv6.pdf>
- Montes, R. Determinación de la Rugosidad de los Pavimentos mediante Perfilometría Longitudinal. Sub-Unidad de Normalización, Laboratorio Nacional de Vialidad. Chile
- UMTRI Research Review (Enero-Marzo 2002). The Shape of Roads to Come: Measuring and Interpreting Road Roughness Profiles. Volumen 33. Número 1.
- De Solminihaç, H., Cabrera, C. Bengoa, E. Evaluación de la Capacidad Estructural y Funcional del Pavimento durante el Proceso de Construcción. Chile.